

Alusliikenteen aaltovaikutukset



Alusliikenteen aaltovaikutukset

Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 13/2018

Kannen kuva: Ari Ruuskanen

Verkkojulkaisu pdf (www.liikennevirasto.fi)

ISSN-L 1798-6656

ISSN 1798-6664

ISBN 978-952-317-525-9

Liikennevirasto

PL 33

00521 HELSINKI

Puhelin 0295 34 3000

Alusliikenteen aaltovaikutukset pohjaeliöstöön. Liikennevirasto, liikenne ja maankäyttö. Helsinki 2018. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 13/2018. 42 sivua ja 2 liitettä. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-525-9.

Avainsanat: alukset, laivaliikenne, aaltoliike, pohjaeliöstö, merialueet, merenkulku

Tiivistelmä

Laivaliikenne aiheuttaa aaltojen sekä potkuri- ja muiden virtausten myötä pohjastressiä ja -eroosiota, joilla on vaikutuksia pohjaeliöstöön. Työn tarkoituksena oli selvittää meriväylien alusliikenteen aaltojen aiheuttamia välittömiä ja välillisiä fysikaalisia vaikutuksia pohjaeliöstöön eli vesikasveihin, makroleviin ja pohjaeläimiin. Tulosten avulla oli tavoitteena tuottaa Suomen merialueelle yleistettävää tietoa laivojen aaltovaikutuksista pohjaeliöstöön.

Laivaliikenne aiheuttaa laiva-aaltojen (Kelvinin aallot) ja imuvaikutuksen (Bernoulli-aallot) myötä fysikaalisia vaikutuksia pohjaeliöstöön. Keskeisiä fysikaalisia vaikutuksia ovat aaltojen rannoille ja matalikolle kuljettaman energiamäärän kasvu ja pohjavirtausten muutokset. Niistä voi aiheutua rapautumista, eroosiota, aineksen kulkeutumista ja sedimentaation muutoksia merenpohjassa ja rannoilla sekä veden lisääntyntä sameutta laivaväylien läheisyydessä. Aaltojen ja virtausten vaikutukset ja niiden voimakkuus riippuvat laivan tyypistä ja nopeudesta, laivaliikenteen intensiteetistä, merialueen syvyydestä, pohjanmuodoista, rannikon avoimuudesta ja eliöyhteisöjen herkkyydestä.

Alusten aaltovaikutuksen pääasiallinen ympäristövaikutus on kiintoaineksen irtoaminen pohjasta ja sekoittuminen vesipatsaaseen, mistä aiheutuu veden samennusta. Samennus vähentää vesikasvien tarvitseman auringon valon määrää vesipatsaassa. Vähentyneen valon seurauksena vesikasviyhteisöjen monimuotoisuus ja lajien kasvusyvytydet taantuvat. Väylien vaikutusalueilla vesikasvien yhteisörakenne on yksipuolisempi kuin vaikutusalueiden ulkopuolella. Vaikutusalueilla taantuvat sellaiset lajit, jotka ovat herkkiä ihmistoiminnan vesiekosysteemiin aiheuttamille häiriöille. Vesikasviyhteisörakenteen taantuminen jatkuu koko väylän käytön ajan. Vesikasvillisuuden taantumisen voimakkuus on sidoksissa aaltovaikutuksen voimakkuuteen. Herkimpiä vesiluontotyyppisiä aaltovaikutukselle ovat pehmeäpohjaiset (hiekkä, muta) luontotyyppit. Vähiten alusliikenteen aaltovaikutuksesta kärsivät kovien kalliopohjien makroleväyhteisöt. Rantavyöhykkeen selkärangattomien eläinten esiintyminen on sidoksissa kasvillisuuteen.

Alusten aaltovaikutusten arvioimiseksi työssä kehitettiin työkalu, joka mallintaa vaikutusta aluksen koon, nopeuden ja kulkusuunnan perusteella. Mallin aineistona voidaan käyttää joko todellista tai simuloitua AIS-aineistoa (Automatic Identification System). Mallin avulla saadaan kvantitatiivinen tunnusluku, joka kuvaa alusten aiheuttamaa aallokon kumulatiivista vaikutusta alusten kulkureittien ympäristössä. Mallin validoimiseksi suositellaan jatkotutkimusta, jossa mitataan alusliikenteen aiheuttamia todellisia virtauksia ja verrataan sitä mallintamalla saatuun vaikutukseen kussakin mittauspisteessä.

Alusten aaltovaikutuksille herkimmiksi kohteiksi tunnistettiin suojaiset ja matalat alueet, joiden läheisyydessä on pehmeää pohjaa. Herkkien kohteiden määrää ja sijoittumista selvitettiin paikkatietanalyysin avulla. Analyysillä kohteita, joiden syvyys on alle 5 m, jotka sijoittuvat aaltoekspositioltaan sulkeutuneisiin alueisiin ja joissa merenpohja on pehmeä. Kohteiden pinta-alan minimikooksi määriteltiin 1 ha. Lähtötietoina kohteiden määrittelyssä käytettiin VELMU-aineistoja. Kohteista muodostettiin tietokanta, johon täydennettiin tiedot sijoittumisesta Natura-alueelle, etäisyys kauppamerenkulun väylään, näkösyvyys ja vertailu meriajokas- ja näkinpartaismallinnusten tuloksiin. Herkkien alueiden yhteispinta-ala on noin 166 000 ha. Niitä alueita on paljon matalilla ja saaristoisilla rannikoilla ja merenlahdissa, esimerkiksi Vaasan ja Porin seudulla ja Turun saaristossa. Kohteiden herkkyyteen alusten aaltovaikutuksille vaikuttavat myös alueen luontainen näkösyvyys kasvukaudella ja biologiset arvot. Valtaosa herkistä kohteista sijoittuu alueille, joissa näkösyvyys on 3–4 m.

Fartygstrafikens vågeffekter på bottenorganismer. Trafikverket, trafik och markanvändning. Helsingfors 2018. Trafikverkets undersökningar och utredningar 13/2018. 42 sidor och 2 bilagor. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-525-9.

Sammandrag

Fartygstrafik orsakar genom vågor, propellerströmmar och andra strömmar bottenstress och bottenerosion som påverkar bottenorganismer. Syftet med arbetet var att utreda de direkta och indirekta fysikaliska effekter som vågor från fartygstrafik i havsfarleder har på bottenorganismer, dvs. vattenväxter, makroalger och bottendjur. Målet var att utifrån resultaten generera sådan information om fartygs vågeffekter på bottenorganismer som kan generaliseras för Finlands havsområde.

Fartygstrafik orsakar genom fartygsvågor (Kelvinvågor) och sug effekt (Bernoullivågor) fysikaliska effekter på bottenorganismer. Centrala fysikaliska effekter är den ökade energimängd som vågor transporterar till stränder och grund samt förändrade bottenströmmar. Dessa kan leda till förvittring, erosion, spridning av material och sedimentationsförändringar på havsbotten och vid stränderna samt ökad grumlighet i vattnet i närheten av farleder. Vågornas och strömmarnas effekter och deras styrka är beroende av fartygets typ och hastighet, fartygstrafikens intensitet, havsområdets djup, bottenformationer, kustens öppenhet och organism-samhällets känslighet.

Den främsta miljökonsekvensen av fartygens vågeffekt är att fasta partiklar lösgörs från botten och blandas upp i vattenpelaren, vilket leder till att vattnet grumlas. Den ökade grumligheten minskar solljuset i vattenpelaren, som vattenväxterna är beroende av. Till följd av den minskade ljusmängden minskar vattenväxtsamhällets diversitet, liksom arternas växtdjup. På farledernas influensområden är vattenväxternas samhällsstruktur ensidigare än utanför influensområdena. Sådana arter som är känsliga för störningar i vattenekosystemet orsakade av mänsklig verksamhet är på tillbakagång i influensområdena. Tillbakagången i vattenväxternas samhällsstruktur fortsätter så länge farleden används. Styrkan i vattenväxthetens tillbakagång är beroende av vågeffektens styrka. Vattennaturtyper med mjuk botten (sand, lera) är mest känsliga för vågeffekten. Makroalgsamhällen på hård klippbotten lider minst av fartygstrafikens vågeffekt. Förekomsten av ryggradslösa djur i strandzonen är beroende av växtligheten.

För att bedöma fartygs vågeffekt utvecklades ett verktyg som modellerar effekten utifrån fartygets storlek, hastighet och färdriktning. Som material för modellen kan användas antingen verkliga eller simulerade AIS-data (Automatic Identification System). Modellen genererar ett kvantitativt nyckeltal som anger fartygsvågornas kumulativa effekter i fartygsrutternas omgivning. För att validera modellen rekommenderas fortsatta undersökningar där man mäter de verkliga strömmar som fartygstrafiken orsakar och jämför detta med den effekt man med modellen fått för respektive mätpunkt.

Skyddade och grunda områden, med mjuk botten i närheten, identifierades som de objekt som var mest känsliga för fartygens vågeffekter. Antalet känsliga objekt och var dessa är belägna utreddes genom analys av geografisk information. Målet med analysen var att identifiera objekt med ett djup på under 5 m, som ligger i slutna områden med tanke på vågexposition och har mjuk havsbotten. Minimiarealen för objekten fastställdes till 1 ha. Som utgångsdata vid identifieringen av objekten användes VELMU-material. För objekten bildades en databas som kompletterades med uppgifter om placering i Naturaområde, avstånd till farled för handelssjöfart, siktdjup och jämförelse med modelleringsresultat för bandtång och kransalger. Den totala arealen för känsliga områden är cirka 166 000 ha. Det finns gott om sådana områden vid grunda och skärgårdsrika kuster och havsvikar, till exempel i Vasa- och Björneborgstrakten och i Åbo skärgård. Objektets känslighet för fartygens vågeffekter påverkas också av områdets naturliga siktdjup under växtperioden och av biologiska värden. Merparten av de känsliga objekten ligger i områden med ett siktdjup på 3-4 m.

Effects of ship-induced waves on benthic species. Finnish Transport Agency, Traffic and Land Use. Helsinki 2018. Research reports of the Finnish Transport Agency 13/2018. 42 pages and 2 appendices. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-525-9.

Abstract

Ships cause waves and propeller flows and other flows that in turn cause seabed stress and erosion which affect benthic species. The purpose of the present study was to investigate the direct and indirect physical impacts of ship-induced waves along shipping lanes on benthic species, i.e. aquatic plants, macroalgae and bottom feeders. The findings are intended to provide information on the effects of ship-induced waves on benthic species that is generally applicable in Finnish sea areas.

Ships have physical impacts on benthic species through their wake (Kelvin waves) and suction forces (Bernoulli waves). The principal physical impacts include increased energy propagated by waves on shores and shallows, and changes to bottom currents. These may lead to weathering, erosion, migration of solids and sedimentation changes on the seabed and on shores, and increased water turbidity in the proximity of shipping lanes. The impacts of waves and flows and how severe they are depend on the type and speed of the ships, the intensity of shipping, the depth of the sea, the contours of the seabed, the openness of the shoreline and the sensitivity of the species communities.

The principal environmental impact of ship-induced waves is the disturbing of solids from the seabed and their mixing into the water column, causing turbidity in the water. Turbidity reduces the amount of sunlight in the water column needed by aquatic plants. Reduced light leads to a decline in the biodiversity and growth depths of aquatic flora. In the impact zones of shipping lanes, aquatic plant communities are less diverse than outside those zones. In the impact zones, species that are sensitive to disruptions to the water ecosystem from human activity decline. This decline continues for all the time that the shipping lane in question is in use. The severity of the decline in aquatic plants correlates with the strength of the effects of waves. Habitats with a soft seabed (sand, mud) are the most sensitive to waves. Macroalgae communities on rocky seabeds are the least affected by ship-induced waves. The incidence of littoral invertebrates is related to the flora.

The study involved developing a tool modelling the impact of ship-induced waves depending on the size, speed and direction of the vessel. The input for this model may be real data or simulated Automatic Identification System (AIS) data. The model returns a quantitative indicator that illustrates the cumulative impact of ship-induced waves around the shipping lane used by the ships. Further research is proposed to validate the model; this research should measure actual flows caused by ships and compare it to the results returned by the model for each measuring point.

Sheltered, shallow waters near a soft seabed were found to be the most vulnerable to the effects of ship-induced waves. The number and location of sensitive sites was explored through geographical information analysis. The analysis focused on sites where water depth is less than 5 m, which are sheltered in terms of wave exposure and where the seabed is soft. The minimum area for a 'site' was set at 1 hectare. VELMU data were used as inputs for defining the sites. A database was collated of the site data and augmented with data on locations in Natura protection areas, distance from commercial shipping lane, level of visibility and comparison to the findings of seawrack and charophyta modelling. The combined area of sensitive sites is about 166,000 ha. There are clusters of these sites along shallow shores in archipelagos and inlets, for instance in the Vaasa and Pori regions and in the Turku archipelago. The sensitivity of any given site to the impact of ship-induced waves is also affected by the natural level of visibility during the growth season and biological values. Most of the sensitive sites are in areas where the level of visibility is 3–4 m.

Esipuhe

Tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää meriväylien alusliikenteen aaltojen aiheuttamia välittömiä ja välillisiä fysikaalisia vaikutuksia pohjaeliöstöön eli vesikasveihin, makroleviin ja pohjaeläimiin. Tavoitteena oli tuottaa Suomen merialueelle yleistettävää tietoa laivojen aaltovaikutuksista pohjaeliöstöön. Tietoja voidaan hyödyntää nopeusrajoituksia ja uusia meriväyliä suunniteltaessa. Tutkimustiedon avulla on mahdollista arvioida meriliikenteen aaltojen aiheuttamat ympäristövaikutukset paremmin ja tunnistaa kohteita tai alueita, jonne ei kannata suunnitella meriväylää tai joilla lieventämistoimenpiteet ovat tarpeen.

Tutkimushankkeen projektipäällikkönä toimi MMM Merilin Vartia Sito Oy:stä, kirjallisuusselvityksen laatijana ja paikkatietoasiantuntijana FM Sonja Oksman Sito Oy:stä, vesiluonnon asiantuntijoina ja mallinnuksesta vastaavina FM Jouni Leinikki ja FilYo Vesa Hautsalo sekä vesiluonnon asiantuntijana FT Ari Ruuskanen Alleco Oy:stä.

Ylitarkastaja Olli Holm toimi Liikenneviraston projektipäällikkönä.

Helsingissä maaliskuussa 2018

Liikennevirasto

Liikenne ja maankäyttö -osasto

Sisältö

1	JOHDANTO	9
2	AINEISTOT JA MENETELMÄT	10
2.1	Kirjallisuusselvitys alusten aiheuttamista fysikaalisista aaltovaikutuksista.....	10
2.2	Biologiset analyysit ja tarkastelukohteet	11
2.3	Suomen rannikkovesien vedenalaiset luontotyypit	12
2.4	Paikkatietoanalyysit.....	13
2.5	Aaltomallinnus.....	13
3	ALUSTEN FYSIKAALISET AALTOVAIKUTUKSET: KIRJALLISUUSSELVITYS ...	14
3.1	Alusten aiheuttamat aallot, imuvaikutus ja potkurivirtaukset.....	14
3.1.1	Alusten aaltotyypit, imuvaikutus ja potkurivirtaukset	14
3.1.2	Aluksen ominaisuudet ja muodostuvat aallot	16
3.1.3	Ympäristön ominaisuudet ja muodostuvat aallot.....	17
3.2	Laivojen aaltojen aiheuttamat fysikaaliset vaikutukset.....	21
3.2.1	Rannoille kohdistuva aaltoenergia ja pohjavirtaukset.....	21
3.2.2	Eroosio, kulkeutuminen ja sedimentaatio	22
3.2.3	Ympäristön ominaisuudet ja fysikaalisten vaikutusten voimakkuus ..	24
4	AALTOMALLINNUS.....	25
5	ALUSTEN AALTOVAIKUTUKSET POHJAELIÖSTÖÖN	28
5.1	Alusten aaltovaikutukset pohjaeliöstöön: Kirjallisuusselvitys	28
5.1.1	Virtausten aiheuttamat suorat biologiset vaikutukset.....	28
5.1.2	Kiintoaineen sekoittuminen vesipatsaaseen	28
5.1.3	Eroosion ja sedimentaation aiheuttamat biologiset vaikutukset	29
5.1.4	Vaikutukset pohjayhteisöjen muodostamiin elinympäristöihin.....	29
5.1.5	Väyläalueiden ympäristössä tapahtuvat ajalliset muutokset pohjaeliöstössä.....	30
5.1.6	Pohjaeliöstöön vaikuttavien alusten aaltojen horisontaalinen ja vertikaalinen ulottuvuus	31
5.2	Alusten aaltovaikutukset pohjaeliöstöön: case Vuosaaren väylä.....	32
5.3	Erilaisten luontotyyppien esiintyminen väyläalueilla ja niiden ympäristössä...	34
5.4	Alusten aaltovaikutuksille herkkimmät luontotyypit, pohjatypit ja alueet.....	35
5.5	Aaltovaikutuksille herkkimmät alueet Suomen rannikkovesissä	35
6	YLEISTETTÄVYYS JA EPÄVARMUUDET	38
7	JOHTOPÄÄTÖKSET JA SUOSITUKSET	39
	LÄHTEET	40
	LIITTEET	
Liite 1	Paikkatietoaineiston metatietokuvaus	
Liite 2	Karttaliite paikkatietoanalyysistä	

1 Johdanto

Laivaliikenne aiheuttaa aaltojen sekä potkuri- ja muiden virtausten myötä pohjastressiä ja -eroosiota, joilla on vaikutuksia pohjaeliöstöön. Vaikutuksia ovat esimerkiksi makrolevien, vesikasvillisuuden ja pohjaeläimistön yhteisörakenteiden ja eliöyhteisöjen muutokset, eliöiden irtaantuminen kasvualustaltaan ja virtausten irrottaman pohjamateriaalin uudelleenlaskeutuminen pohjaeliöstön päälle. Aaltojen ja virtausten vaikutukset ja niiden voimakkuus riippuvat muun muassa laivan tyypistä ja nopeudesta, laivaliikenteen intensiteetistä, merialueen syvyydestä, pohjanmuodoista, rannikon avoimuudesta ja eliöyhteisöjen herkkyydestä. Rannikon tuntumassa laivaliikenteen vaikutuksia vähennetään muun muassa nopeusrajoituksilla.

Työn tarkoituksena oli selvittää meriväyliä alusliikenteen aaltojen aiheuttamia välittömiä ja välillisiä fysikaalisia vaikutuksia pohjaeliöstöön eli vesikasveihin, makroleviin ja pohjaeläimiin. Tulosten avulla oli tavoitteena tuottaa Suomen merialueelle yleistettävää tietoa laivojen aaltovaikutuksista pohjaeliöstöön.

Tietoa voidaan hyödyntää nopeusrajoituksia ja uusia meriväyliä suunniteltaessa. Tutkimustiedon avulla on mahdollista arvioida meriliikenteen aaltojen aiheuttamat ympäristövaikutukset paremmin ja tunnistaa kohteita tai alueita, jonne ei kannata suunnitella meriväylää tai joilla lieventämistoimenpiteet ovat tarpeen. Tietoa voidaan käyttää hyväksi myös lupaprosesseissa.

Työn ensimmäisessä vaiheessa selvitettiin alusten aalloista ja niiden aiheuttamista fysikaalisista vaikutuksista merenpohjaan ja ranta-alueisiin kirjallisuuden perusteella keskeisten vaikutusmekanismien selvittämiseksi. Tämän jälkeen selvitettiin pohjaeliöstöön kohdistuvia alusten aaltovaikutuksia kirjallisuuden ja aikaisemmin tehtyjen tutkimusten aineistojen uudelleen käsittelyn perusteella. Ajallisia vaikutuksia tutkittiin analysoimalla biologista aineistoa Vuosaaren väylällä ennen väylän rakentamista ja sen jälkeen. Aineistoa testattiin sen jälkeen aaltomallilla. Kirjallisuusselvitysten, biologisten analyysien ja aaltomallinnuksen perusteella tunnistettiin alusten aaltojen aiheuttamat keskeisimmät vaikutukset pohjaeliöstöön sekä alusten aaltovaikutuksille herkeimmät luonto- ja pohjatyypit sekä aaltovaikutuksille alttiimmat paikat. Lopuksi tehtiin koko Suomen rannikkovesiä kattava paikkatietoanalyysi, millä selvitettiin alusten aaltovaikutuksille herkeimmät alueet.

Työtä ovat olleet tekemässä FM Sonja Oksman ja MMM Merilin Vartia Sito Oy:stä sekä FM Jouni Leinikki, FilYo Vesa Hautsalo ja FT Ari Ruuskanen Alleco Oy:stä. Työtä on ohjannut Olli Holm Liikennevirastosta.

2 Aineistot ja menetelmät

2.1 Kirjallisuusselvitys alusten aiheuttamista fysikaalisista aaltovaikutuksista

Selvitystä varten haettiin tieteellisiä artikkeleita ja tutkimusraportteja alusliikenteen aalloista ja niiden aiheuttamista fysikaalisista ja biologisista vaikutuksista merenpohjaan ja ranta-alueille. Kirjallisuutta etsittiin lähinnä Itämeren alueelta, sillä muille merialueille soveltuvat johtopäätökset aaltovaikutuksista eivät välttämättä päde selvitysalueilla, joihin liittyvät Itämeren erityispiirteet. Itämeren alueelta löytyi kattavasti aineistoja kirjallisuusselvitystä varten.

Alusliikenteen aalto- ja virtausvaikutuksia saaristoväylillä maastotutkimuksin on tutkittu lähes yksinomaan Suomessa ja Ruotsissa (Paukkeri 2010). Vuosaaren väylällä on tutkittu alusten aiheuttamien aaltovaikutusten ja imuvaikutuksen ulottuvuuksia eri nopeuksilla ja aaltojen aiheuttamia ihmisvaikutuksia sekä navigoinnin turvallisuutta (Mykkänen & Kiirikki 2015, Paukkeri 2010). Turun ja Naantalin väyliltä puolestaan on tehty tutkimusta merenpohjan virtausten muodostumisesta laivaväyliä läheisyydessä ja eroosioherkkyydestä (Virtasalo 2001, Suomela 2016, Mykkänen & Lindfors 2013). Tallinnan edustalla on selvitetty mm. suurinopeuksisten alusten aallonmuodostusta ja eroosiota sekä laiva-aaltojen suhdetta tuuliaaltoihin (Rannat ym. 2005, Soomere 2006, Kelpsaite ym. 2009). Tukholman saaristossa ja Suomen Saaristomerellä on tutkittu laivaliikenteen aiheuttamia ekologisia vaikutuksia ja rantojen eroosioriskejä (Rönneberg 1981, Eriksson ym. 2004, Granath 2007, Hansen & Snickars 2014). Aallonmuodostuksen teoriaa tarkastellaan esimerkiksi seuraavissa lähteissä: Granath 2007, Rytönen ym. 2001, Virtasalo 2001, PIANC 2003.

Tutkimusasetelmia

- Allenström ym. 2003: Aluksen uppoumavirtauksen aiheuttamaa vedenpinnan korkeuden alenemaa on tutkittu mallikokeilla laboratoriossa. Tutkittiin 194 m pitkän aluksen aiheuttamaa vedenpinnan alenemaa neliönmuotoisessa, 148 m x 148 m kokoisessa lahdessa aluksen sivuuttaessa lahden eri nopeuksilla ja etäisyyksillä.
- Eriksson 2004: Sisältää 15 Ruotsissa laivaväyliä varrella sijaitsevaa tutkimuskohdetta, joissa tehtiin vedenalaisia kasvinlajoja ja sameusmittaukset.
- Eriksson ym. 2004: Effects of boating activities on aquatic vegetation in the Stockholm archipelago, Baltic Sea - Estuarine, Coastal and Shelf Science 61 (2004) 339–349.
- Granath 2007: Tukholmasta Suomeen johtavalla laivaväylällä mitattiin 8 pisteellä väylän lähellä aaltoja ja vedenpinnan alenemaa.
- Hansen J.P. & Snickars M. 2014: Applying macrophyte community indicators to assess anthropogenic pressures on shallow soft bottoms. - Hydrobiologia.
- Kelpsaite ym. 2009: Aaltomittauksia syvyysalueella n. 2.7 m, n. 100 m päässä rannalta ja 2700 m laivaväylältä Tallinnanlahdella.
- Lindfors & Huttunen 2015: Vedenlaadun, pinnankorkeuden ja virtausten mitausta 600–1500 m väylältä Airstolla
- Mykkänen & Kiirikki 2015: Vuosaaren väylän tuntumassa 4 pisteellä mitattiin aallonkorkeutta ja imuvaikutuksen pinnanlaskua.

- Mykkänen & Lindfors 2013: Mitattiin virtausnopeuksia Turun saaristossa Porokarilla 8 m vesipatsaassa kohdassa, jossa alusten turvallinen nopeus on 5 solmua.
- Nyman ym. 2005: Kökarin väylällä aaltomittauksia, laivojen ohitusnopeus 15–21 solmua.
- Paukkeri 2010: Vuosaaren väylällä mitattiin alusten ohitusten aikaisia aallonkorkeuksia ja pohjavirtauksia 2 mittauskohteessa, etäisyydet väylälle 400 ja 750 m, syvyys n. 1,5 m.
- Rytkönen ym. 2002: VTT:n laivalaboratoriossa on tehty mallikokeita, joissa tutkittiin autolauttojen aiheuttamaa aallonmuodostusta kapeilla saaristoväylillä.
- Rytkönen ym. 2001: Airstolla aalto- ja virtausmittauksia kahdella pisteellä 550 ja 650 m väylästä.
- Rönnerberg, Olof 1981: Traffic effects on rocky-shore algae in the archipelago sea, SW Finland. PhD thesis. Åbo Akademi.
- Virtasalo ym. 2000: Tutkittiin virtausnopeuksia ja vedenpinnankorkeutta Ruissalon edustalla 350 m leveällä väylän kohdalla, mittauspisteellä n. 7 m syvyydellä
- Virtasalo 2001: Pohjois-Airstolla kahdella kohteella tutkittiin sedimentaatiotekijöitä: pohjan virtauksia, aaltoja, merenpohjan lujuutta ja suspendoitunutta kiintoainesta.

2.2 Biologiset analyysit ja tarkastelukohteet

Biologisia analyysejä varten käytiin läpi kirjallisuutta, jonka avulla tunnistettiin alusten aaltojen aiheuttamat keskeiset vaikutusmekanismit ja vaikutukset pohjaeliöstöön. Alusliikenteen vaikutuksia on tutkittu rantavyöhykkeen vesikasvillisuuteen, selkärangattomiin ja kaloihin

Tässä työssä vaikutusten tarkastelu rajattiin vesikasvillisuuteen, koska siitä oli saatavilla eniten tutkimustietoa ja vesikasvillisuuden tutkimisessa käytetyt menetelmät sopivat lähtöaineiston analyysiin. Yleisesti on todettu, että selkärangattomien ja kalojen yhteisökoostumusten vaihtelut ovat sidoksissa vesikasvillisuuden vaihteluihin (Rönnerberg 1981, Kangas ym. 1982, Hansen & Snickars 2014). Vesikasvillisuuden yhteisökoostumus ja alakasvurajan syvyys edustavat myös muita luontoarvoja, eli näiden muuttujien muutoksen mukana muuttuvat myös muut rantavyöhykkeen luontoarvot, kuten selkärangattomat ja kalat. Yhteisökoostumus ja alakasvurajan syvyys reagoivat ihmistoiminnan paineisiin, ja ne toimivat veden tilan ilmentäjinä.

Alusliikenteen aiheuttamat vaikutukset vesikasvillisuuteen selvitettiin kirjallisuuden ja tätä työtä varten kerätyn lähtöaineiston ja sen analysoinnin avulla. Kirjallisuusselvitykseen otettiin mukaan Ruotsin ja Suomen rannikkovesillä tehtyjä tutkimuksia ja selvityksiä. Todettiin, että vesikasvillisuutta on parasta tarkastella lajikoostumuksen ja yhteisörakenteen kautta.

Kirjallisuuden mukaan MI_c -indeksi (Macrophyte Index Community) ja FMI-indeksi (Finnish Macrophyte Index) soveltuvat alusliikenteen vesikasveihin aiheuttamien vaikutusten tarkasteluun (Hansen & Snickars 2014, Ruuskanen 2016). MI_c ja FMI ovat indeksejä, joiden muuttujina ovat muun muassa vesikasvillisuuden yhteisörakenne, lajisto ja lajien kasvusyvytydet. MI_c -indeksi kuvaa vesikasviyhteisön herkkien ja sietokykyisten lajien (engl. sensitive / tolerant) suhteellisia osuuksia. Sensitive-lajit taantuvat todennetusti ihmistoiminnasta aiheutuneiden paineiden vuoksi. Tolerant-lajit hyötyvät ihmistoiminnasta tai eivät kärsi siitä. FMI (Finnish Macrophyte Index) on indeksi, joka perustuu tiettyjen indikaattoripunalevien alakasvurajojen syvyyden

muutoksiin. Nämä puolestaan ilmentävät ihmistoiminnan paineita, käytännössä vesipatsaaseen makrolevien käyttöön saapuvan auringonvalon määrää ja sen muutosta (esim. Ruuskanen 2016). M_{IC} soveltuu käytettäväksi pehmeiden pohjien luontotyypeillä ja FMI kovien pohjien luontotyypeillä.

Biologisten analyysien lähtöaineistoina toimivat VELMUn (Vedenalaisen meriluonnon monimuotoisuuden inventointiohjelma) ja Alleco Oy:n keräämät vesikasvillisuusaineistot, joista muodostettiin tätä työtä varten yhdistetty tietokanta. Aineisto rajattiin Helsingin lähivesillä kerättyyn aineistoon ja luokiteltiin sijainnin perusteella laivaväylän vaikutusalueella ja sen ulkopuolella sijaitseviin havaintoihin. Tarkempi selvitys alusten vaikutuksista vesikasvillisuuteen tehtiin Vuosaaren väylän osalta. Vuosaaren väylää koskeva aineisto luokiteltiin myös ajallisesti. Alusliikenteen vaikutuksia tarkasteltiin ennen Vuosaaren väylän rakentamista ja sen jälkeen.

Alusliikenteen aiheuttamia vaikutuksia vesikasvillisuuteen tarkasteltiin pehmeiden ja kovien pohjien vesikasviyhteisöjen avulla. Pehmeitä pohjia ovat muun muassa hiekka- ja mutapohjia. Kovat pohjat ovat kalliopohjia. Vaikutusten tarkastelu kohdistettiin tässä työssä putkilokasvien ja makrolevien muodostamiin vesikasviyhteisöihin. Putkilokasveista tarkasteltiin yhteisökoostumusta ja makrolevistä lajien alakasvurajojen syvyyksiä. Vesikasvillisuuden muutoksen tarkastelun käytettiin pehmeillä pohjilla M_{IC}-indeksiä ja kovilla FMI-indeksiä.

2.3 Suomen rannikkovesien vedenalaiset luontotyypit

Suomen rannikkovesien vedenalaiset luontotyypit ja niiden luokittelu perustuvat pääasiassa pehmeiden ja kovien pohjien vesikasvien lajistoon ja yhteisörakenteeseen. Vedenalaisten luontotyyppien luokittelua varten on käytössä useita menetelmiä. Yleisimmät vedenalaisten luontotyyppien luokittelumenetelmät ovat Natura 2000 -luontotyypit (Airaksinen & Karttunen 2001) ja niin sanotut kansalliset luontotyypit (Raunio ym. 2008). Lisäksi vesilaissa ja luonnonsuojelulaissa on mainintoja yksittäisistä luontotyypeistä ja lajeista.

Natura-luontotyyppiluokittelu perustuu EU:n ympäristödirektiiviin ja on velvoittavaa. Kansallinen luontotyyppiluokittelu perustuu Suomen (meri)luonnon ominaisuuksiin ja on Natura-luontotyyppiluokittelua yksityiskohtaisempi. Natura-luokittelua käytetään pääasiassa Natura-alueiden luontoarvojen tarkastelussa. Kansallista luokittelua käytetään yksityiskohtaisemman tarkastelun apuna.

Erilaisten luontotyyppien esiintymistä väyläalueilla ja niiden ympäristössä on tarkasteltu luvussa 5.3 ja alusten aaltovaikutuksille herkimpiä luontotyypejä luvussa 5.4.

2.4 Paikkatietoanalyysit

Paikkatietoanalyysin avulla muodostettiin aineisto alusten aaltovaikutuksille herkistä kohteista ja niille ominaisuustietoja.

Herkiksi kohteiksi valittiin seuraavat kriteerit täyttävät alueet:

- matala: syvyys alle 5 m
- sulkeutunut: aaltoekspositioluokka 1–5
- pohja pehmeää
- ala vähintään 1 ha

Määrittelyssä lähtöaineistoina käytettiin VELMU-paikkatietoaineistoja. Lähtöaineistot on listattu raportin lähdeluettelossa.

Aineistoon täydennettiin paikkatietoanalyysien ja -liitosten avulla seuraavia ominaisuustietoja:

- sijoittuminen Natura-alueille
- etäisyys lähimmästä kauppamerenkulun väylästä
- vertailu meriajokas- ja näkinpartaisniittyjen VELMU-mallinnusten tuloksiin
- näkösyvyys

Tulosaineiston luokat on kuvattu yksityiskohtaisemmin liitteessä 1 (Paikkatietoaineiston metatietokuvaus).

2.5 Aaltomallinnus

Laiva-aaltojen vaikutusten arvioimisen helpottamiseksi luotiin tässä raportissa (Luku 3) kerätyn kirjallisuustiedon pohjalta yksinkertaistettu tietokonemalli. Kelvinin aalto-teoriaan ja Frouden syvyyslukuun perustuvan mallin avulla on tarkoitus simuloida laivaliikenteen aiheuttamaa aaltovaikutusta väylien ympäristöissä käyttäen taustaineistona liikennetietoja. Karkean työkalun avulla voidaan nopeasti verrata erilaisia suunnitelmien versioita keskenään.

Laiva-aaltojen muodostuminen ja käyttäytyminen ovat kuitenkin huomattavan monimutkaisia tapahtumia, eikä voimakkaan yksinkertaistettu malli välttämättä toimi riittävän tarkasti. Mallia päästiin alustavasti testaamaan Ahvenanmaalla vuonna 2014 kerätyllä mittausaineistolla (Lindfors & Kiirikki 2015). Sen käyttökelpoisuuden lopulliseksi arvioimiseksi esitämme kuitenkin jatkotutkimusta.

3 Alusten fysikaaliset aaltovaikutukset: Kirjallisuusselvitys

3.1 Alusten aiheuttamat aallot, imuvaikutus ja potkurivirtaukset

3.1.1 Alusten aaltotyypit, imuvaikutus ja potkurivirtaukset

Laiva-aallot ja luonnonaallot

Luonnonaallokko syntyy, kun tuuli puhalttaa pitkin veden pintaa ja luovuttaa liike-energiaansa veteen, jolloin vesi alkaa virrata. Sileä vedenpinta rikkoutuu ja tuuli pääsee tarttumaan näihin vedenpinnan epätasaisuuskohtiin, jolloin vesi alkaa aalloilla. Aallossa vesipartikkelit liikehtivät paikallaan ympyrän tai ellipsin muotoista orbitaalirataa pitkin. Luonnonaallot eroavatkin syntyvaltaan erilaisista laiva-aalloista erityisesti vesimassan kulkeutumisessa, sillä laiva-aaltojen mukana vesimassa liikkuu aaltojen mukana eteenpäin. (Paukkeri 2010.)

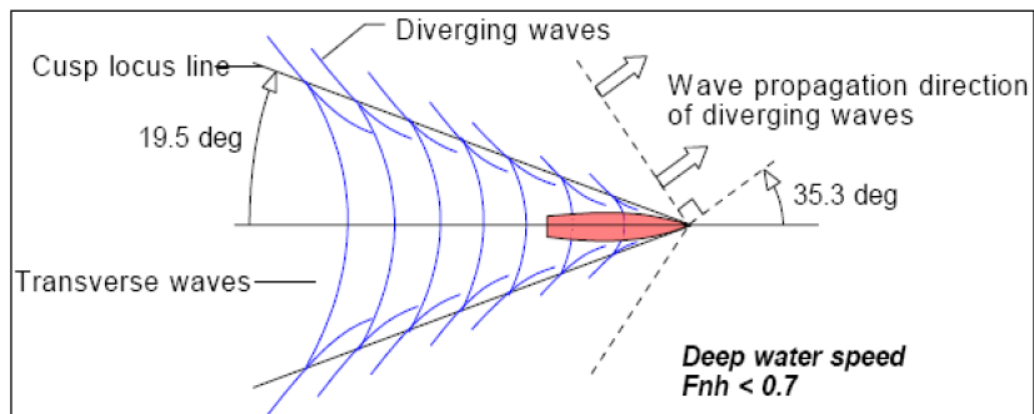
Koska laivojen aiheuttamat aallot ovat usein tuuliaaltoja pitkäaaltoisempia ja nopeampia, niiden vaikutus yltää vesipatsaassa tuuliaaltoja syvemmälle. Laivojen aiheuttamat aallot aiheuttavat korkeamman paineen/energian rannoille kuin tuuliaallot, mikä aiheuttaa enemmän rapautumista, eroosiota ja kulkeutumista. (PIANC 2003.)

Airistolla tehdyssä selvityksessä (Lindfors & Huttunen 2015) todettiin, etteivät laivojen aallokko-vaikutukset erottuneet luonnonaallokosta yli 10 m/s tuulennopeudella.

Kelvinin aallot

Aluksen aiheuttamaa aaltosysteemiä voidaan kuvata yksinkertaisimmillaan Kelvinin 1800-luvulla kehittämän aaltoteorian avulla. Aaltoteorian mukaan alusta voidaan pitää yksittäisenä painepisteenä, joka aiheuttaa aaltoja kulkiessaan veden pinnassa. Teorian mukaan aaltoja muodostuu kahdenlaisia: aluksen taakse muodostuvia, kulkusuuntaan nähden *poikittaisia aaltoja* (transverse waves) ja aluksesta *eroavia aaltoja* (diverging waves). (Paukkeri 2010, PIANC 2003.)

Aaltojen nopeus ja aaltoväli ovat suhteessa aluksen nopeuteen. Poikittaisten aaltojen periodi on noin kolmannes ja erkanevien noin neljännes laivan nopeudesta solmuina (Nyman 2005). Aluksesta eroavat aallot muodostavat noin $35,3^\circ$ kulman aluksen liikesuunnan kanssa. Poikittaisten ja eroavien aaltojen aallonharjat kohtaavat suoralla (cusp locus line), joka muodostaa noin $19,5^\circ$ kulman aluksen liikesuunnan kanssa (Kuva 1) (Paukkeri 2010).



Kuva 1. Aaltojen muodostuminen syvässä vedessä Kelvinin aaltoteorian mukaan. (Allenström et al. 2003)

Kelvinin aaltoja muodostuu syvässä vedessä, jolloin pohja ei vaikuta aaltojen muodostumiseen ja etenemiseen. Kelvinin teorian mukaiset laivan aallot vaimenevat yleisesti etäisyyden (x) käännteisluvun eksponenttiin (x^n). Eksponentti n on Havelockin yleisesti käytetyn teorian mukaan $-1/2$ poikittaisille aalloille ja $-1/3$ erkaneville aalloille. Koska erkanevat aallot vaimenevat hitaammin, potenssia $-1/3$ onkin yleisesti käytetty kuvaamaan aaltojen vaimenemista, kun ollaan kiinnostuneita aaltojen ympäristövaikutuksista. Todellisuudessa vaimenemisvauhti vaihtelee ja aaltojen vaimenemiseen vaikuttavat ympäristötekijät, kuten luonnonaallokko ja tuuli, joten kokeissa parhaita vastavuuksia on saatu myös muille luvuille (esim. $-0,2$ ja $-0,55$). (Nyman ym. 2005, PIANC 2003.)

Bernoulli-aallot

Kelvin-aaltojen lisäksi alus aiheuttaa liikkueessaan niin sanottuja Bernoulli-aaltoja. Ne muodostuvat, kun uppoamarunkoinen alus syrjäyttää uppoumansa suuruisen vesimäärän. Alus työntää edetessään vettä alleen ja sivuilleen ja tämän vesimäärän täytyy kiertää alus. Samalla aluksen perään jää aluksen syrjäyttämän vesimassan vuoksi vajaus, jota lisää vielä potkureiden pyöriessään imemä vesimassa. Tämä vajaus pyrkii täyttymään aluksen lähiympäristöstä. (Paukkeri 2010.)

Tarkastelukohdassa rannalla aluksen lähestyessä havaitaan vedenpinnan nousu, joka on yleensä voimakkaimmillaan aluksen keulan tullessa suoraan tarkastelupisteen kohdalle. Vedenpinnan nousun jälkeen seuraa nopea pinnan alenema (imuvaikutus, draw-down), jolloin myös virtaussuunta muuttuu rannasta poispäin (takaisinvirtaus). Suurin vedenpinnan alenema havaitaan yleensä aluksen perän ohittaessa tarkastelukohdan. Vedenpinnan aleneman jälkeen seuraa jälleen pinnan nousu, joka on suuruudeltaan noin puolet havaitusta maksimaalisesta pinnan alenemasta. Ohituksen jälkeen vedenpinta rannassa heilahtelee edestakaisin virtaussuunnan muuttuessa rantaa kohden ja rannasta poispäin vielä useita minuutteja aluksen ohituksen jälkeen. (Allenström ym. 2003, Rytönen ym. 2001, Paukkeri 2010.)

Kuten Kelvinin aallot, imuvaikutuskin vaimenee etäisyyden funktiona. Lähdekirjallisuudessa ei esitetty matemaattista lauseketta imuvaikutuksen vaimenemiselle, mutta sitä voidaan tarkastella tehtyjen mittausten perusteella. Esimerkiksi Vuosaaren väylän tutkimuksissa (Mykkänen & Kiirikki 2015) imuvaikutusta havaittiin 200–800 metrin

etäisyydellä sijainneissa mittauspisteissä, mutta ei enää 2600 m etäisyydellä. Ruotsissa tehtyjen mallikokeiden (Allenström ym. 2003) perusteella voidaan todeta, että alenema on voimakkaasti riippuvainen aluksen ohitusetäisyydestä. Vedenpinnan alenema koejärjestelyn lahdessa vähenee alussa suhteellisen nopeasti ohitusetäisyyden kasvaessa, mutta vähenemisnopeus hidastuu suuremmilla etäisyyksillä. Kun ohitusetäisyys kasvaa, myös ero vedenpinnan alenemassa lahden suun ja sisäosan välillä kaventuu. Etäisyyden ollessa 225 m ero on jo lähes merkityksetön. (Paukkeri 2010.)

Potkurivirtaukset

Väyläalueella ja satamissa aluksen lähellä eroosiota aiheuttavat aluksen propulsiolaitteistojen aiheuttamat virtaukset eli potkurivirtaukset ja takaisinvirtauksen nopeuskenttä aluksen ympärillä (Nyman ym. 2005). Lähdekirjallisuudessa ei esitetty sellaisia selvityksiä, joissa potkurivirtaukset olisi voitu erottaa Bernoulli-aaltojen aiheuttamista virtauksista. Virtausten lisäksi potkurit voivat matalilla väylillä aiheuttaa suoraa mekaanista häiriötä eliöstölle esimerkiksi silpomalla kasvillisuutta (Granath 2007).

3.1.2 Aluksen ominaisuudet ja muodostuvat aallot

Aluksen koko, syväys ja muoto

Aluksen koko ja syväys voivat vaikuttaa Bernoulli-aaltojen muodostumiseen syrjäytyvän vesimassan tilavuuden kautta. Esimerkiksi Vuosaaren väylän tutkimuksessa todettiin, että suuret ropax-alukset aiheuttavat tyypillisesti merkittävästi suuremman korkeusvaihtelun kuin pienet roro-alukset ja hieman suuremman vaihtelun kuin keskikokoiset roro-alukset (Paukkeri 2010). Toisaalta aluksen koon tai syväyksen vaikutuksesta Kelvinin aaltojen muodostumiseen ei löytynyt selviä ja yhdenmukaisia viitteitä lähdekirjallisuudesta. On kuitenkin selvää, että aluksen muoto vaikuttaa sen aiheuttamiin Kelvinin aaltoihin. Aluksen keulassa, rungossa ja perässä muodostamat erilaiset aaltosysteemit voivat interferoida keskenään ja näin joko vahvistaa tai heikentää toisiaan. Runkoaaltojen muodostumista voidaankin vähentää keulan muotoilulla (ns. bulb) (Paukkeri 2010).

1 solmu = 1.852 km/h

Itämerellä toimivien alusten tyyppi on muuttunut 2000-luvulla (Kelpšaitte ym.2009). Suurimmat ja pisimmät aallot aiheuttavat laivat on otettu pois käytöstä. Sen sijaan alusten koko ja nopeudet ovat kasvaneet 15–20 solmista 25–30 solmuun. Laivaväylät ovat silti edelleen samat eikä nopeusrajoituksia ole muutettu, joten yhä suurempi osuus laivoista liikkuu lähes kriittisellä nopeudella, milloin suurimmat aallot muodostuvat (Kelpšaitte ym.2009). Toisaalta runkosuunnittelun parantumisen myötä uudet alukset muodostavat vähemmän Kelvinin aaltoja. Silti imuvaikutukset ovat kasvaneet alusten koon kasvun myötä (Nyman ym. 2005).

3.1.3 Ympäristön ominaisuudet ja muodostuvat aallot

Aluksen nopeus ja veden syvyys

Koska aluksen nopeus ja veden syvyys yhdessä vaikuttavat aallonmuodostukseen, niitä käsitellään tässä samassa yhteydessä.

Aallon korkeus on likimain verrannollinen aluksen nopeuden neliöön, eli $H_{\max} \propto U^2$ (Rytönen ym. 2002, Nyman ym. 2005). Vesisyvyyden ja aluksen nopeuden suhdetta aallonmuodostukseen kuvaa Frouden syvyysluku, jota esitellään mm. lähteissä Paukkeri (2010), PIANC (2003), Rytönen ym. (2002).

Frouden syvyysluku ilmaistaan kaavalla

$$Fn_h = \frac{V}{\sqrt{gh}}$$

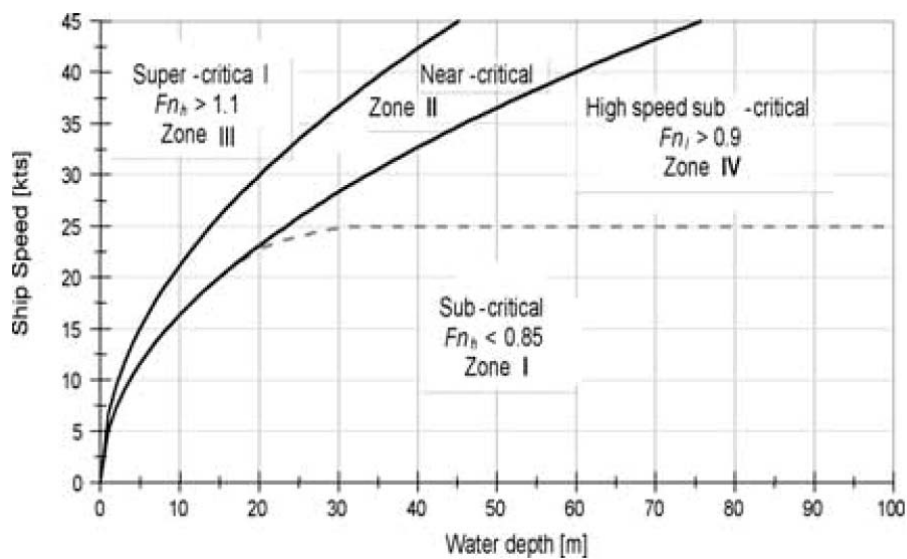
jossa V (m/s) on aluksen nopeus, g (m/s²) on painovoiman kiihtyvyys ja h (m) on veden syvyys.

Klassinen Kelvinin aaltokuvio syntyy, kun Frouden syvyysluku on alle 0,57. Soomeren (2006) mukaan kuvio muuttuu pohjan vaikutuksesta, kun Frouden luku on 0,55–0,7. Kuvio muuttuu merkittävästi, kun luku ylittää 0,85 (PIANC 2003).

Todellisuudessa aluksen muodostama aaltokuvio on monimutkaisempi, koska aaltoja ei muodostu vain yhdessä pisteessä (keulassa) vaan myös aluksen rungossa ja perässä. Esimerkiksi Paukkeri (2010) havaitsi, että lähes kaikilla selvityksen aluksilla oli havaittavissa 2–3 aaltoryhmää, joista ensimmäinen (keula-aallot) oli tyypillisesti voimakkain.

Kun alus kulkee sen nopeuteen nähden matalassa vedessä, ja Frouden syvyysluku lähenee 1:stä, aaltojen korkeus kasvaa huomattavasti ja aaltoväli pitenee (Soomere 2006, PIANC 2003.) Kriittisellä syvyysalueella (kun $0,9 < Fn_h < 1,1$) liikkuva alus voi muodostaa erityisen suurienergisen aaltokuvion (Soomere 2006). Kun Frouden syvyysluku ylittää 1,1, kyseinen aaltokuvio katoaa. Syvyysluvun kasvaessa edelleen aallot taipuvat enemmän taakse (PIANC 2003).

Aluksen syväys tarkoittaa aluksen rungon alaosan suurinta pystysuoraa etäisyyttä vedenpinnan tasosta. Syväys ei ole vakio, vaan se vaihtelee muun muassa aluksen lastin painon, trimmikulman, veden suolapitoisuuden tai veden lämpötilan muuttuessa. Myös aluksen kulkunopeus vaikuttaa aluksen syvyyteen aluksen nopeuspainuman (squat) kautta. Tässä ilmiössä alus painuu liikkuessaan sitä syvemmälle, mitä suuremmalla nopeudella se kulkee. (Paukkeri 2010.)



Kuva 2. Frouden luvun (F_n) määrittää aluksen nopeus ja veden syvyys. Frouden luku puolestaan määrittää aluksen aiheuttaman aaltokuvion. (PIANC 2003)

Kun aluksen nopeus kasvaa tai veden syvyys pienenee, aluksen aiheuttaman aallon korkeus kasvaa, pituus lyhenee ja aaltorintaman eroamiskulma suhteessa alukseen muuttuu. Tavanomaiset alukset, kuten kontti- ja roro-alukset, liikkuvat yleensä subkriittisellä nopeusalueella, joskin kriittisellä nopeusalueella liikkuvien alusten määrä on 2000-luvulla lisääntynyt (Kelpšaitte ym 2009). Esimerkiksi Vuosaaren väylällä alukset liikkuvat nykyisellä nopeusrajoitusalueella väyläalueen syvyys ja alusten nopeudet huomioiden pääasiassa syvän veden nopeuden alueella $F_n < 0,7$ (Paukkeri 2010).

Vuosaaren väylällä (Paukkeri 2010) on tarkastellut aallonkorkeutta alusten lähellä. Laiva-aallon korkeus noin 10 solmun nopeuksilla vaihtelee välillä 0,3–0,45 m. Nopeuksilla 18–19 solmua aallonkorkeus on jo metrin luokkaa. Aallonkorkeus kasvaa melko tasaisesti aluksesta riippuen noin 18–22 solmun nopeuteen saakka. Kun Frouden syvyydluku F_n lähenee arvoa 0,7, aallonkorkeus alkaa kasvaa voimakkaasti nopeuden lisääntyessä. Suurimmat laiva-aallot syntyivät laivan liikkuessa noin 13–19 solmun nopeudella, jolloin liikutaan subkriittisellä syvyysalueella. Tällöin aallonkorkeus on syntyessään ollut noin 0,5–0,8 m.

Tallinnanlahdella on mitattu suurinopeuksisten laivojen muodostamia aaltoja. Johtavien aaltojen korkeus on tyypillisesti metrin luokkaa ja jakso 10–15 sekuntia (Soomere 2006). Alle 10 m syvillä alueilla johtavat aallot voivat olla jopa 100 m pitkiä, jolloin aaltoja ja niiden vaikutusta ei voida kuvata tyypillisesti käytetyn lineaarisen aaltoteorian avulla (Rannat ym. 2005).

Aluksen nopeus vaikuttaa olennaisesti myös Bernoulli-aaltojen syntymiseen. Vuosaaren väylän tutkimuksessa 2010 (Paukkeri 2010) todettiin suurten ropax-alusten aiheuttamien vedenpinnan korkeusvaihteluiden lähes lineaarisesti riippuvan alusten ohitusajan aikaisista nopeuksista: jokaista 5 km/h nopeuden lisäystä kohden korkeusvaihtelu lisääntyi likimain 0,1 m. Vuosaaren väylän tuoreemmassa selvityksessä (Mykkänen & Kiirikki 2015) ohitusnopeus selitti 60 % havaitusta imuvaikutuksen suuruudesta. Nopeudella 10 solmua vaikutus oli luonnollisten ilmiöiden suuruusluokkaa ja suurimmat vaikutukset mitattiin, kun ohitusnopeudet olivat yli 16 solmua. Laboratoriotesteissä imuvaikutus havaittiin vasta 9 solmun nopeudella (Allenström ym. 2003).

Myös nopeuden vaihtelut vaikuttavat aaltojen muodostumiseen. Vuosaaren väylän tutkimuksessa havaittiin, että Krokholmenissa pientenkin alusten aiheuttamat vedenpinnan korkeusvaihtelut voivat olla suhteellisen suuria, jos alukset hiljentävät nopeuttaan mittauspisteen lähellä. Tässä nykyinen nopeusrajoitus vaihtuu rajoituksesta 30 km/h rajoitukseen 17 km/h. (Paukkeri 2010.)

Kelvinin aallot ja aluksen nopeus

- Friman 1989: Turun saaristossa havaittiin 500 m etäisyydellä väylästä pienemmillä autolautoilla 16–17 solmun nopeuksilla maksimissaan 0,45–0,55 m korkeita aaltoja. Suuremmilla 18–20 solmun nopeuksilla havaittiin jopa 0,90 m korkeita aaltoja.
- Granath 2007: Tukholman edustalla havaitut korkeimmat aallonkorkeudet olivat n. 80 cm nopeudella 17 solmua.
- Nyman ym. 2005: Kökarin väylällä todettiin, että aaltojen jaksot ovat keskimäärin 3,5–6,5 sekuntia. Laivojen ohitusnopeus oli n. 15–21 solmua ja aallot muodostuivat pääosin syvän veden alueella.
- Paukkeri 2010: Mittauksissa havaittiin 150 m väylästä alusnopeuksilla 8–12 solmua 0,25–0,35 m korkeita aaltoja. Mittauskohteessa, jonka etäisyys väylälle oli noin 300 m, havaittiin 16 solmun nopeuksilla 0,5 m korkeita aaltoja.
- Rytönen ym. 2001: Mittauskohteessa 650 m etäisyydellä havaittiin autolautojen ohitusten aikana alusnopeuksilla 15–20 solmua maksimissaan 0,30–0,60 m korkeita periodiltaan 1,5–4,0 s aaltoja. Toisessa mittauskohteessa 550 m etäisyydellä havaitut aallot 12 solmun nopeuksilla olivat n. 0,40 m korkeudeltaan ja 5–6 s. periodiltaan.

Bernoulli-aallot ja aluksen nopeus

- Allenström ym. 2003: Alle 9 solmun nopeudella alenemaa ei havaita lainkaan. Nopeusvälillä 9–12 solmua pinnan alenema kasvaa lähes lineaarisesti nopeuden kasvaessa, välillä 12–15 solmua pinnan aleneman kasvunopeus hidastuu ja voimistuu jälleen nopeuden kasvaessa yli 15 solmuun.
- Granath 2007: Korkein mitattu alenema oli 170 cm, matalassa salmessa nopeudella 12 solmua. Keskiarvoinen alenema kohteessa oli n. 100 cm. Mittauspiste n. 11 m väylältä. Toinen suuri alenema oli syvemmassä salmessa n. 12 solmun nopeudella, max n. 100 cm, keskiarvo n. 60 cm. Kohteiden välinen keskimääräinen alenema n. 0,1–1 m.
- Paukkeri 2010: Krokholmenin pisteessä korkeusvaihtelu oli jo 20 km/h nopeudella kohtalaisen suurta. Kuiva-hevosella pienet roro-alukset eivät aiheuttaneet merkittäviä korkeusvaihteluja ennen kuin noin 30 km/h nopeuksilla. Suurilla ropax-aluksilla korkeusvaihtelu oli kohtalaisen suurta jo 25 km/h nopeuksilla.
- Rytönen ym. 2001: Alukset aiheuttivat 20–25 cm vedenpinnan korkeusaleneman, jonka heilahtelun periodi oli 60–80 s. Alustennopeudet olivat n. 10–20 solmua.
- Virtasalo 2001: 350 m leveässä salmessa havaittiin minuutissa tapahtunut vedenpinnan 30 cm lasku. Laivojen nopeudet olivat 15–16,7 km/h.

Merenpohjan ja rantojen muodot

Ympäristön ominaisuudet, kuten merenpohjan muodot, vaikuttavat aaltojen muodostumiseen jo syntyhetkellä, mikäli aluksen nopeus on suuri suhteessa veden syvyyteen. Merenpohjan muodot vaikuttavat aaltoihin viimeistään siinä vaiheessa, kun ne saapuvat matalikolle tai rantaan. Aallot muuntuvat matalikolla tai rannalla, jolloin ne voivat esimerkiksi lyhentyä ja kasvaa korkeutta, pidentyä ja taipua, murtua tai nousta ylös rantaa. Merenpohjan muodot vaikuttavat myös imuvaikutuksen suuruuteen mittauskohteella (Bernoulli-aallot).

Tutkimuksessa Granath (2007) havaittiin autolauttaliikenteen voivan aiheuttaa huomattavan suuria vedenpinnan korkeusvaihteluja ja aaltoja väylän varrella olevien saarten rantojen tuntumassa. Erityisen suuria vaikutuksia havaittiin kapeassa ja matalassa salmessa, missä Bernoulli-aallot korostuvat huomattavasti. Ruotsissa Nykvarnsholmen kapeassa salmessa on mitattu keskimäärin yli metrin, suurimmillaan 170 cm, vedenpinnan aleneminen. Salmen kohdalla laivojen nopeus on 12 solmua. Jo 50 m päässä mittauspisteestä alenema on huomattavasti vähäisempi, 50–60 cm. (Granath 2007.)

Bernoulli-aaltojen ilmeneminen on selvää myös lahdenpoukamissa. Aluksen uppoumavirtauksen aiheuttamaa vedenpinnan korkeuden alenemaa on tutkittu mallikokeilla laboratoriossa (Allenström ym. 2003). Merkittävä havainto kokeiden aikana oli, että vedenpinnan alenema oli suurempaa lahden sisäosassa kuin lahden suulla aluksen ohitusetäisyyden ollessa pieni. Vedenpinnan alenema on lahden sisäosassa nopeudesta riippumatta noin kaksinkertaista lahden suuhun verrattuna, kun alus ohittaa lahden 75 metrin etäisyydellä (Paukkeri 2010.).

Kulma, jossa aallot kohtaavat rannan, vaikuttaa aaltoihin. Kun laiva-aaltojen tulosuunta ei ole rantaa vasten kohtisuorassa, rantaan kantautuvat aallot taipuvat ja siten menettävät nopeuttaan ja energiaansa. Tätä havainnoidaan sellaisissa tilanteissa, kun mitatuissa aalloissa on huomattavia eroja samalla väylällä eri suuntiin kulkevien laivojen suhteen. Myös imuvaikutuksen suuruuteen vaikuttaa laivan liikkeen kulma suhteessa rantaan. Esimerkiksi Vuosaaren väylän selvityksissä havaittiin, että satamasta lähtevien alusten aiheuttama imuvaikutus oli noin kaksinkertainen saapuviin aluksiin verrattuna (Mykkänen & Kiirikki 2015). Pohjois-Airistolla tehdyssä selvityksessä todettiin, että vaikutukset olivat eniten riippuvaisia aluksen ajosuunnasta, suunta oli siis merkittävämpi tekijä kuin ajonopeus (Lindfors & Huttunen 2015). Kulkusuunnan vaikutus näkyi etenkin peräaaltojen painevaikutuksen aiheuttamassa pinnankorkeuden nousussa.

Sen lisäksi, että aaltojen nopeus ja korkeus muuttuvat rantaa lähestyessä, myös aallon muoto muuttuu. Kelvinin teorian mukaiset aallot syvässä vedessä muodostuvat ns. siniaalloiksi eli lineaarisiksi aalloiksi. Tallinnanlahdessa tehdyn tutkimuksen mukaan laiva-aallot muuttavat muotoaan merkittävästi kaveten huipustaan ("cnoidal wave") jo 10–15 m syvyydessä. Tuuliaallot taas pysyvät pitkälti lineaarisessa muodossa vielä 4–5 m syvyydessä, koska niiden aallonpituus on selvästi laiva-aaltoja lyhyempi. (Rannat 2005.)

Virossa on tutkittu sitä, miten nopeiden alusten johtavat aallot muodostuvat ja käyttäytyvät osittain sulkeutuneilla vesialueilla (Soomere 2006). Tällöin alusten edellä voi muodostua suurienergisiä aaltoja (solitary waves, precursor solitons). Nämä aallot voivat kiirehtiä kauas aluksen edelle ylävirtaan ja käyttäytyvät kohdatessaan tavallisista lineaarisista (siniaalloista) poikkeavasti. Erityisen tuhoisia vaikutuksia voi syntyä silloin, kun nämä aallot kohtaavat matalikolla ja muodostavat hyökyaallon tai rosvoaallon.

Luonnonaallokko

Laivojen aaltovaikutusta tarkasteltaessa aaltoja on verrattava luonnonaallokkoon. Luonnonaallokko voi heikentää laiva-aaltojen vaikutusta ja luonnonaallokon vähäisyys voi altistaa kohteita laiva-aaltojen vaikutukselle.

Luonnonaallokon korkeuden ollessa suurempaa kuin laivan aaltojen, laiva-aallot voivat vaimentua. Luonnonaallokon vaimentava vaikutus riippuu sen voimakkuudesta ja suunnasta suhteessa laiva-aaltoihin. Luonnonaallokon ei sitä vastoin ole todettu merkittävästi vahvistavan laiva-aaltoja. (Paukkeri 2010.)

Sellaiset alueet, jotka ovat tuulelta suojassa ja luonnonaallokko on laiva-aaltoja huomattavasti lyhyempää, ovat erityisen alttiita laiva-aaltojen aiheuttamille vaikutuksille. Esimerkiksi fladat ja matalikot voivat olla tällaisia suojaisia ympäristöjä (Nyman ym. 2005). Tallinnanlahdessa tyypillinen tuuliaallokon jakso on 2–4 sekuntia, korkeimmillaan 6–7 sekuntia, ja nopeiden alusten johtavan aallon jakso on usein 10–15 sekuntia (Rannat 2005).

Alusten aaltojen yhteisvaikutus

Jo 80-luvulla on joissakin tapauksissa havaittu kahden tai useamman aluksen yhteisvaikutuksessa alusten aiheuttamien aaltoryhmien vahvistavan toisiaan (Paukkeri 2010). Nopeiden alusten johtavat aallot voivat aiheuttaa erityisen voimakkaita vaikutuksia (Soomere 2006).

3.2 Laivojen aaltojen aiheuttamat fysikaaliset vaikutukset

Keskeisiä fysikaalisia vaikutuksia

- Aaltojen rannoille ja matalikoille kuljettaman energiamäärän kasvu
- Pohjavirtausten muutokset
- Rapautumisen, eroosion, kulkeutumisen ja sedimentaation muutokset
- Veden lisääntynyt sameus laivaväylien läheisyydessä

3.2.1 Rannoille kohdistuva aaltoenergia ja pohjavirtaukset

Fysikaalisten vaikutusten kannalta olennaista on, muuttavatko laiva-aallot ympäristön normaalitilaa esimerkiksi lisäämällä rannoille tai merenpohjaan enemmän painetta tai energiaa kuin luonnonaallokko.

Tallinnanlahdella on havaittu, että laivojen aallot ovat muodostaneet huomattavan joidenkin osan keski- ja korkeaaenergistien rantojen hydrodynaamisesta aktiviteetista.

Tilanne on muuttunut 2000-luvulla kahdesta syystä, sillä laiva-aaltojen korkeus on siis kasvanut suhteessa tuuliaaltojen korkeuteen. Päivittäiset laiva-aaltojen korkeusmaksimit ovat nykyään korkeudeltaan samaa luokkaa vuosittaisten tuuliaaltojen korkeusmaksimien kanssa. Tallinnanlahdella laiva-aallot vastaavat 10 % aaltoenergiasta ja 25 % energiavirrasta, joten laiva-aaltojen vaikutukset vaikuttavat rantojen energiataseeseen merkittävästi etenkin vähätuulisina kuukausina. (Kelpäite ym. 2009.)

Rantaan kulkeutuvat laiva-aallot voivat aiheuttaa suhteellisen voimakkaita virtauksia rantavyöhykkeellä. Virtaukset ovat tavallisesti voimakkaimmillaan kohdassa, jossa aallot murtuvat. Mitä korkeampi ja pidempi aalto on, sitä syvemmillä ja suurempia virtausnopeuksia se aiheuttaa. Jyrkkärantaisissa pienissä lahdissa tai laguuneissa vedenpinta voi aaltojen vaikutuksesta jäädä heilahtelemaan ”pumpaten” edestakaisin, jolloin rantaveteen voi muodostua pitkäkestoisia pyörteisiä virtauksia. (Rytönen ym. 2002 kuten viitattu teoksessa Paukuri 2010.) Airistolla toteutetussa selvityksessä havaittiin (Lindfors & Huttunen 2015) laivan ohituksesta seuraavan häiriötilanteen kestävän noin 15 minuuttia.

Virtausnopeuksia mittauskohteissa

- Paukuri 2010: Suurimmat nopeudet mitattiin suurten ropax-alusten ohitusten aikana. Näiden alusten uppoumavirtausten aikaiset maksimivirtausnopeudet vaihtelivat välillä 18–60 cm. Kelvin-aallot aiheuttivat maksimivirtausnopeuksia 45–55 cm/s. Nopeudet olivat 4–10 kertaisia taustavirtauksiin verrattuna. Pienten alusten aiheuttamat virtaukset eivät poikenneet merkittävästi mitatuista taustavirtausnopeuksista.
- Virtasalo 2001: Laivojen ohikulkujen aikana mitattiin jopa 71 cm/s virtauksia 40 cm pohjan yläpuolella. Laivaliikenteen virtaushäiriöt todettiin niin voimakkaiksi, että ne erodoivat tutkimusalueen pohjasedimenttiä.
- Mykkänen & Lindfors 2013: Porokarin selvityksessä havaittiin vain vähäisiä luonnollista vaihtelua pienempiä virtausnopeuksien nousuja laivojen ohitusten aikana.
- Rytönen ym. 2001: Toisella mittauspisteellä havaittiin jopa 10-kertaisia virtausnopeuksia, kun nopeudet ylsivät 50–60 cm/s. Toisella pisteellä havaittiin noin 20 cm/s oskilloivia virtaushäiriöitä ja korkeimmillaan 40 cm/s virtausnopeuksia.

3.2.2 Eroosio, kulkeutuminen ja sedimentaatio

Laivojen aiheuttamat aallot ja virtaukset voivat aiheuttaa merenpohjaan ja rannoille fyysikaalisia vaikutuksia eli rapautumista, eroosiota, kulkeutumista ja sedimentaatiota. Laivojen aiheuttamat aallot aiheuttavat kivisille rannoille korkeamman paineen kuin tavalliset tuuliaallot, mikä voi lisätä rapautumista (PIANC 2003).

Aallot ja pohjanläheiset virtaukset kuluttavat merenpohjaa alueilla, missä veden liikkeen kulutusvoimat ovat suurempia kuin pohja-aineksen lujuus. Veden kulutusvoimien heikentyessä kuljetuksessa ollutta kiintoainesta laskeutuu pohjalle. Sellaisilla alueilla, missä kiintoainesta vuoroin irtoaa pohjasta ja vuoroin laskeutuu pohjalle, tapahtuu kiintoaineksen kulkeutumista (Virtasalo 2001).

Eroosio

Alusten muodostamien aaltojen on todettu aiheuttaneen rannan ja merenpohjan eroosion lisääntymistä, ja ne voivat aiheuttaa myös huomattavia muutoksia rantaprosessien kulloiseenkin tasapainoon (Soomere 2006). Eroosioon vaikuttaa myös pohjan herkkyys eroosiolle, mitä kuvaa määre leikkauslujuus. Koheesiovoimien vaikutuksesta tiivis ja lujasti koossa oleva pohjan hienoaaines ei sekoitu veteen niin helposti kuin löyhä ja irtonainen aines. (Virtasalo 2001). Kuitenkin vedenpeittämien savi-, siltti- ja liejukerrostumien ylin osa on löyhää, vesipitoista ja huonosti konsolidoitunutta ainesta, joka on erittäin herkkää resuspendoitumaan (Virtasalo 2001). Myös orgaanisen aineksen määrän kasvu lisää herkkyyttä eroosiolle. Suomela (2016) on tutkinut laboratoriokokein Pohjois-Airiston liejusavien leikkauslujuutta. Runsas eroosio lisää myös sedimentin pohjakulkeutumista ja resuspensiota, mikä lisää veden sameutta (PIANC 2003).

Viime vuosikymmeninä laiva-aaltojen aiheuttamassa eroosiossa on tapahtunut muutoksia. Aiemmin on alusten todettu aiheuttaneen enemmän eroosiohaittoja sora- ja hiekkarannoilla kuin nykyään. Jotkin vanhat alusten aaltovaikutuksille alttiit eroosiorannat ovat saavuttaneet tasapainotilan, jossa eroosio on pysähtynyt ja uusi kasvilisuus on peittänyt vauriokohtia (Nyman ym. 2005). Uuden sukupolven alusten aiheuttamat imuvaikutukset ovat kasvaneet, jolloin pohjaan sedimentoitunut löyhä aines lähtee herkemmin liikkeelle ja kulkeutuu virtausten mukana akkumulaatiopohjille (Nyman ym. 2005).

Kulkeutuminen

Koheesiomaalajit (hieno hieta, hiesu, savi) kulkeutuvat suspensoitumalla veteen tai liejuvirtoina pohjanläheisissä kerroksissa (Virtasalo 2001). Suspensio tarkoittaa sitä, että nesteeseen sekoittuu sinne liukenematonta ainesta. Liejukerros on muutaman senttimetrin paksuinen ja koostuu runsaasti orgaanista ainesta sisältävästä hienoaineksesta. Liejuvirrat liikkuvat painovoiman ja veden virtausten ajamina. Kitkamaalajit kulkeutuvat saltaationa vierimällä, liukumalla tai pomppimalla pohjaa pitkin (Virtasalo 2001). Paikallisesti sedimenttikuljetus voi olla hyvinkin herkkää hydrodynaamisen energiataseen muutokselle, mikäli kriittiset eroosion ja kasautumisen kynnyksarvot ovat lähellä (Kelpšaitė 2009).

Suspensio lisää veden samentumista laivaväylien varrella. Tästä on tehty havaintoja Ruotsissa (Eriksson ym. 2004), Suomessa (Virtasalo 2001) ja Virossa (Rannat 2005). Turun saaristossa laivaliikenteen aiheuttama resuspensio näkyi suspendoituneen kiintoaineksen määrän ja raekoon kasvuna laivojen ohikulkujen aikana otetuissa vesinäytteissä. Suurin veden kiintoainepitoisuus 1 m pohjan yläpuolella, 700 m etäisyydellä väylästä oli 14,3 mg/l. Suurimpien suspendoituneiden rakeiden halkaisija oli yli 1,5 mm. (Virtasalo 2001.)

Tallinnanlahdella on mitattu, että nopeiden alusten aallot muuttavat merkittävästi veden sameutta pohjan lähellä noin metrin korkuisessa vesikerroksessa 2–5 m syvillä alueilla. Suspendoitunut aines pysyy vesipatsaassa noin 5 minuutin ajan. On arvioitu, että jos ainesta irtoaa gramma neliömetrillä, vuosittain irtoaa 100 litraa hienosedimenttejä jokaista juoksevaa rantaviivametriä kohden (Rannat ym. 2005). Kuitenkin erityisesti nopeista aluksista aiheutuvat pitkät aallot ulottuvat hyvinkin vielä jopa 10–25 m syvyysalueella pohjaan (Nyman ym. 2005), mikä mahdollistaa sedimentin kulkeutumisen syvemmälläkin.

Sedimentaatio

Sedimentaatiota tapahtuu, kun partikkelin laskeutumisnopeus on suurempi kuin veden turbulenssin pystysuuntaisen komponentin nopeus. Akkumulaatioalueilla kiintoainesta kerrostuu pysyvästi.

Aaltojen tulokulma ja pituus vaikuttavat siihen, minne sedimenttiä kulkeutuu. Mikäli aallot saapuvat rantaan vinossa kulmassa, sedimenttiä kulkeutuu rannan suuntaisesti. Lyhyet aallot kasaavat sedimenttiä rannan suuntaan ja pitkät huuhtovat materiaalia rannalta poispäin. Laivoilla on havaittu kumpaakin vaikutusta. (PIANC 2003.)

3.2.3 Ympäristön ominaisuudet ja fysikaalisten vaikutusten voimakkuus

Kuten yllä todettiin, pohjan herkkyys kulutus- ja kuljetusprosesseille riippuu merenpohjan leikkauslujuudesta, johon liittyy aineksen raekoko, koheesio, vesipitoisuus ja orgaanisen aineksen pitoisuus. Lisäksi kohteen herkkyyteen laiva-aalloille vaikuttavat esimerkiksi syvyys ja luonnonaallokko (ks. luku 3.1.3).

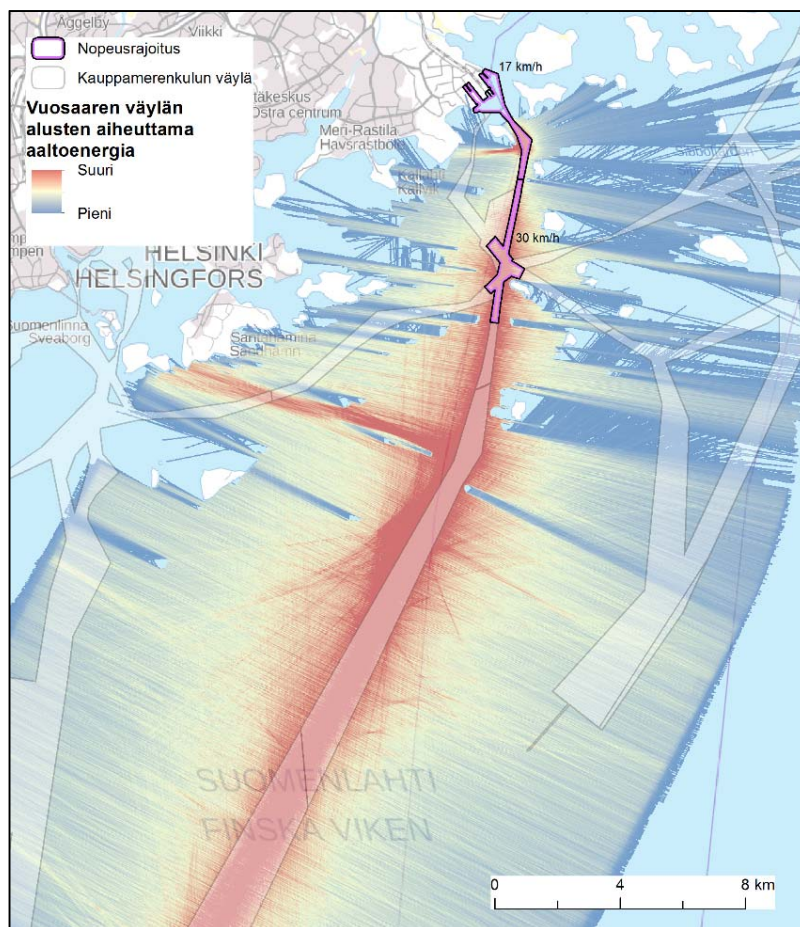
4 Aaltomallinnus

Jotta alusliikenteen fysikaalista vaikutusta voidaan arvioida suunnittelussa, loimme yksinkertaistetun matemaattisen mallin aaltojen vaikutuksesta eri etäisyyksillä erikokoisilla aluksilla, jotka kulkevat eri nopeuksilla. Mallissa on lähtötietoina alusten reitti, nopeus ja syväys sekä merenpohjan syvyysmalli. Nämä tiedot saadaan joko toteutuneesta liikenteestä AIS-aineiston (Automatic Identification System) avulla tai ne voidaan syöttää manuaalisesti vaikutusten arvioimiseksi esimerkiksi väylien suunnitteluvaiheessa.

Laivanaaltomalli laskee jokaiselle AIS-pisteelle Frouden syvyysluvun (aluksen nopeus / $\sqrt{g \cdot \text{veden syvyys}}$),

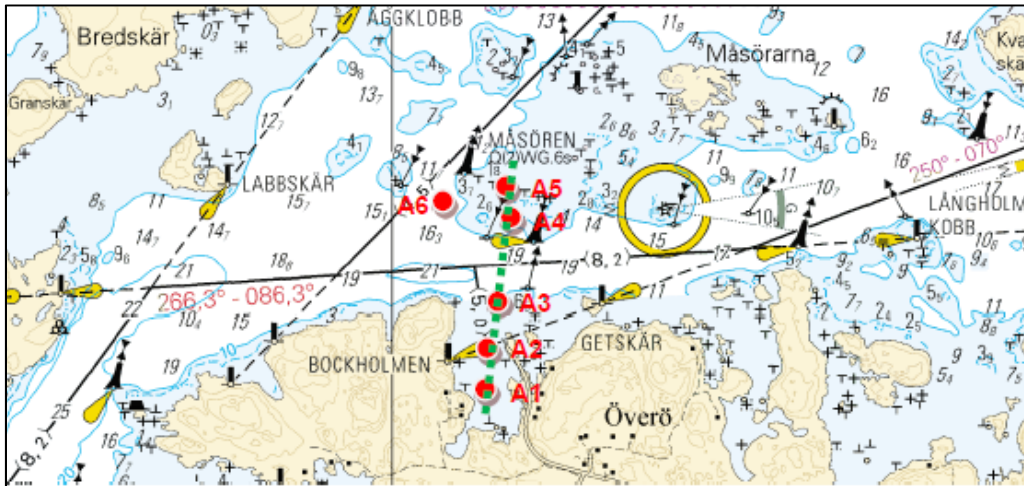
$$Fn_h = \frac{V}{\sqrt{gh}}$$

Malli pitää Frouden syvyyslukua lähtöarvonaan laskiessaan vaikutuksen vaimenemista aluksen kulkusuuntaan nähden molemmille sivuille, käyttäen vaimenemisen Havelockin etäisyyskerrointa $\text{etäisyys}^{-1/3}$. Lopputulos on kaikkien alusten kaikkien näiden säteiden summa. Esimerkkinä on Vuosaaren sataman väylältä tehty graafinen esitys mallista (Kuva 3).



Kuva 3. Laivanaaltomalli esitettynä Vuosaaren sataman väylältä vuonna 2017.

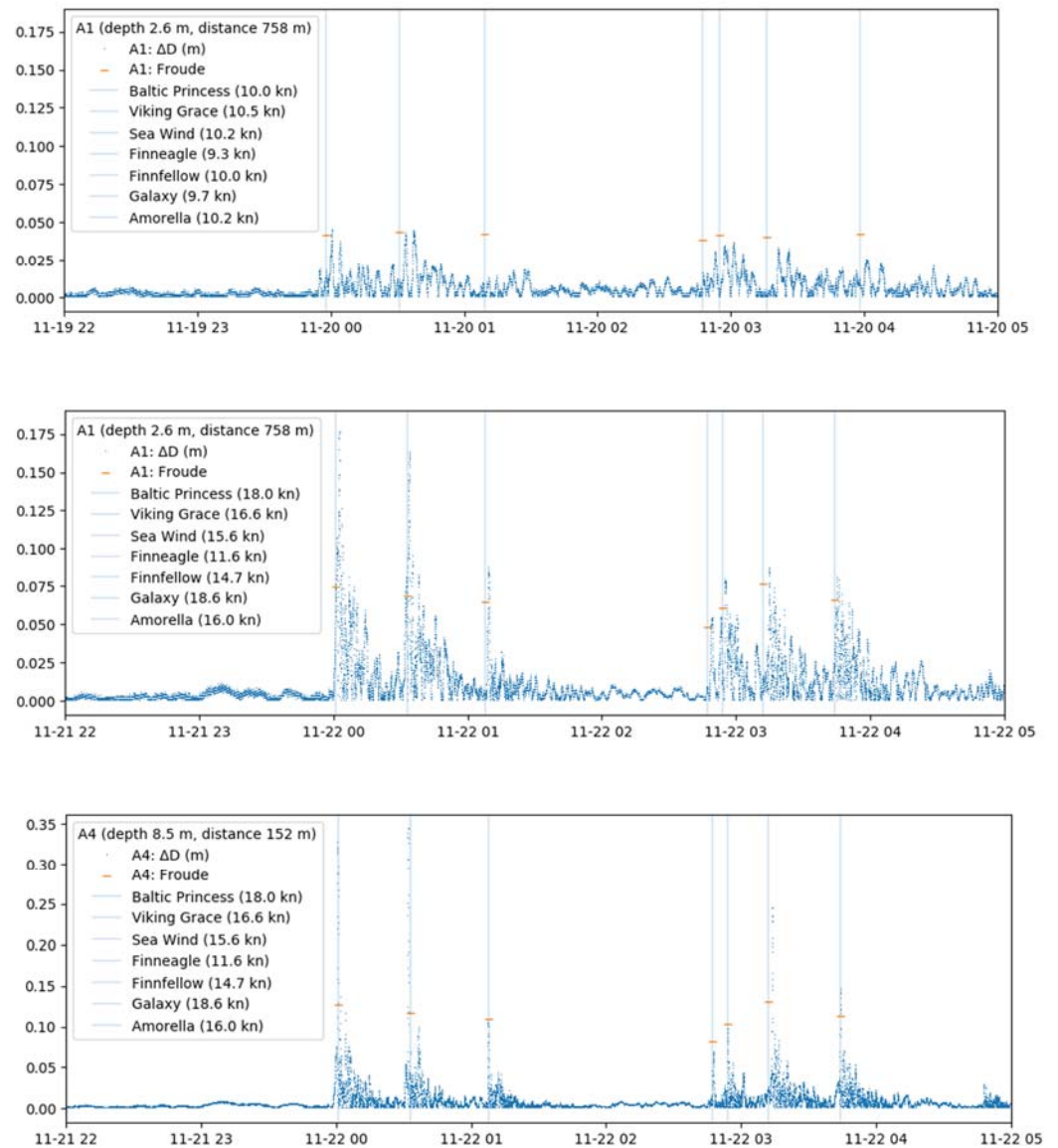
Malli kuvaa aallokon vaikutusta yleisellä tasolla eikä erottele esimerkiksi Kelvinin ja Bernoulli-aaltoja toisistaan. Vertasimme mallia Ahvenanmaan Överön edustalla mitattuihin arvoihin kokeessa, jossa seitsemän erilaista alusta ohitti mittausasemien linjan eri nopeuksilla (Kuva 4). Mallin avulla laskettiin tunnusluvut alusten aaltovaikutukselle, kun ne ohittivat mittausasemien kohdalla olevan Liikenneviraston syvyysmittauspisteen FI409000000155276 (19 m) (Kuva 4). Froudin syvyysluku FNH laskettiin käyttäen syvyyttä 19 metriä.



Kuva 4. Mittauspaikat (pinnankorkeus, sameus ja virtaukset) Överön pohjoispuolella. Alennettuja nopeuksia käytettiin kuvassa näkyvällä väyläosuudella 8,2 metrin väylällä. Kuvassa on merkitty punaisilla palloilla mittauspisteet A1-A6 ja vihreällä katkoviivalla sameusluotauslinjan sijainti. (Lindfors & Kiirikki 2015)

Laivojen aiheuttamat syvyyden muutokset ja mallin avulla lasketut arvot on esitetty kolmessa tapauksessa (Kuva 5). Malli reagoi laivojen nopeuden muutoksiin jokseenkin yhtenevästi mittaus tulosten kanssa. Vaikutus näkyy myös selvemmin laivan kulkureittiä lähellä olevalla pisteellä A4 kuin etäämmällä A1.

Jotta mallia ja siihen tehtyä tietokoneohjelmaa voidaan käyttää tehokkaasti meriliikenteen suunnittelutyön apuna, se tulisi kalibroida varta vasten laaditulla koeasetelmalla. Tähän tarvitaan useita aallonkorkeusmittareita, kohtalaisesti liikennöity laivaväylä sekä sillä kulkevien alusten AIS-tiedot kokeen ajalta.



Kuva 5. Ohittavien laivojen aaltojen aiheuttamat aallot Ahvenanmaalla, Överön pohjoispuolella. Siniset pisteet kuvaavat syvyyden muutosta 30 minuutin liukuvasta keskiarvosta, ja oranssit viivat ovat laivan ohituksista laskettuja Frouden syvyyslukuja vaimennettuna Havelockin etäisyyskertomella, $n=-1/3$. Selitelaatikossa on pisteen nimi, pohjan syvyys ja etäisyys referenssipisteestä sekä ohittavien laivojen nimet ja nopeudet.

5 Alusten aaltovaikutukset pohjaeliöstöön

5.1 Alusten aaltovaikutukset pohjaeliöstöön: Kirjallisuusselvitys

Kirjallisuusselvityksessä tunnistettiin keskeisiä alusliikenteen aiheuttamia biologisia vaikutuksia. Pohjaeliöstöön aiheutuvia vaikutuksia on esitetty tarkemmin seuraavissa luvuissa.

Keskeisiä biologisia vaikutuksia

- Kiintoaineen sekoittuminen vesipatsaaseen (samennus) ja valo-olosuhteiden heikkeneminen
- Sedimentin laskeutuminen tukahduttaa kasveja ja elinympäristöjä
- Elinympäristön muuttuminen (esim. uusia akkumulaatiopohjia/eroosiorantoja)
- Lajiston muuttuminen
- Lajimäärän väheneminen ja lajiston vertikaalinen siirtyminen matalampaan suuntaan
- Virtausten ja aaltojen aiheuttama selkärangattomien eliöiden rikkoutuminen tai kulkeutuminen pois elinympäristöstä
- Kalaston katoaminen

5.1.1 Virtausten aiheuttamat suorat biologiset vaikutukset

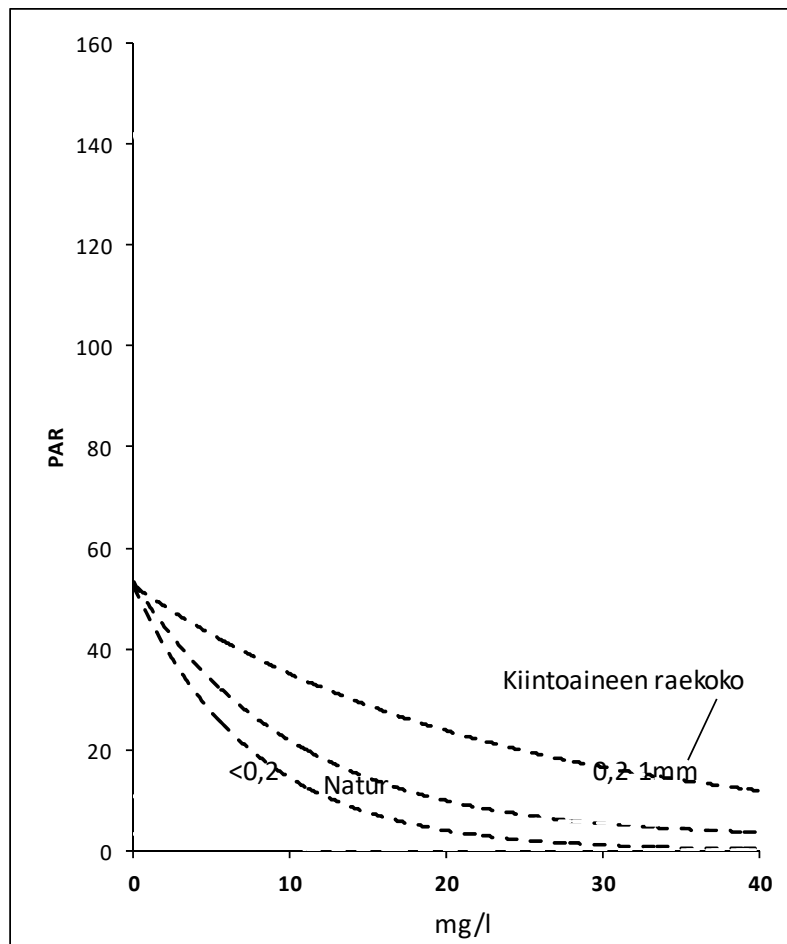
Laiva-aallot ja niiden aiheuttamat virtaukset voivat aiheuttaa merenpohjan eliöiden rikkoutumista tai kulkeutumista pois elinympäristöstään. Ne myös huuhtelevat irta-
naista sedimenttiä pois kasvien ja kivien pinnoilta, millä on epäsuoria ekologisia vai-
kutuksia. Pitkällä aikavälillä elinympäristöt voivat muuttua, ja eliölajeja poistua alu-
eelta pysyvästi. (PIANC 2003.)

Virtausten aiheuttamia epäsuoria vaikutuksia tarkastellaan luvuissa 5.1.3 ja 5.1.4.

5.1.2 Kiintoaineen sekoittuminen vesipatsaaseen

Alusliikenteen aalto- ja imuvaikutuksen pääasiallinen ympäristövaikutus on vesipat-
saan samentuminen. Samennus rajoittaa vesikasvien elintoimintoihin tarvitseman au-
ringonvalon tunkeutumista veteen. Vettä samentava ympäristövaikutus syntyy, mikäli
rantavyöhykkeessä aalto- ja imuvaikutuksen voima voittaa pohja-aineksen kitkamaa-
lajin, jolloin pohja-aines alkaa liikkua ja sekoittua veteen. Veden liikkeen loputtua kiin-
toaine vajoaa takaisin pohjalle.

Veteen sekoittuneen kiintoaineen määrä eli samennuksen voimakkuus ja viipymä riip-
puvat vesipatsaan liike-energian voimasta ja kiintoaineen raekoosta. Mitä pienempi
raekoko on, sitä helpommin ja suurempina määrinä kiintoaine sekoittuu vesipatsaa-
seen ja sitä vähemmän auringon valoa tunkeutuu vesipatsaaseen. Näin ollen sama kiin-
toainemäärän sekoittuminen veteen vähentää veteen tunkeutuvan valon määrää sitä
enemmän, mitä pienempi raekoko on (Kuva 6). Samennuksen vaikutus on myös sitä
merkittävämpi, mitä syvemmällä samennus aiheutuu, sillä syvemmällä on jo luonnos-
taan vesikasveille heikommät valo-olosuhteet.



Kuva 6. Veteen liuenneen kiintoaineen (x- akseli) määrän muutos muuttaa veteen tunkeutuvan vesikasvien yhteyttämiseen tarvitseman auringonvalon (PAR-valo $\mu\text{Mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, y-akseli) määrää. Katkoviivat kuvastavat valon määrän vähenemistä kolmen eri kiintoaineen raekoon osalta. Kiintoaine Natur = luonnonpohjan raekoko. Esimerkiksi veden samentuessa 5 mg/l (NTU), valon määrä putoaa noin 50 %, jos kiintoaineen raekoko on < 0,2 mm, mutta noin 10 %, jos raekoko on 0,2-1 mm. (Ruuskanen 2017)

5.1.3 Eroosion ja sedimentaation aiheuttamat biologiset vaikutukset

Hienoaineksen kulkeutuminen pois kasvualustalta voi vaikuttaa vesikasvillisuuden lajistoon ja yhteisörakenteeseen. Hienojakoisen sedimentin laskeutuminen voi tukahduttaa kasveja, pohjaeläimiä ja lisääntymisalueita. Veden samentuminen vähentää pohjaan saapuvan valon määrää, mikä voi aiheuttaa muutoksia vesikasvillisuudessa (PIANC 2003). Ravinteiden kulkeutuminen sedimentistä veteen voi myös aiheuttaa leväkukintoja ja siihen liittyen sameuden lisääntymistä (PIANC 2003). Suspensio ja hienoaainesten sedimentaatio voi myös heikentää kalojen kutualueiden olosuhteita ja nostaa pilaantuneita sedimenttejä uudelleen veteen (Soomere 2006).

5.1.4 Vaikutukset pohjayhteisöjen muodostamiin elinympäristöihin

Raskas laivaliikenne voi aiheuttaa ympäristöhaittaa etenkin herkillä alueilla, kuten kosteikoilla ja matalaenergisillä rannoilla (Kelpsaite ym. 2009). Erityisen merkittäviä muutokset voivat olla matalien lahtien ja fladojen ympäristössä (Nyman ym. 2005).

Laiva-aaltojen seurauksena voi aiheutua kasvillisuuden lajiston muutoksia muun muassa huuhteluvaikutuksen seurauksena. Kalliorannoilla voi ilmetä lajimäärän pienenemistä ja sedimentin kulkeutumista. Suuret kiintoainepitoisuudet voivat haitata eri eliöryhmien kehitystä ja muuttaa kalojen käyttäytymistä (Nyman ym. 2005). Lajiston muutoksiin vaikuttavat myös muuttuneet valaistusolosuhteet, eroosio ja sedimentaatio.

Ruotsissa on selvitetty kenttäkokein lauttaliikenteen vaikutuksia ekosysteemiin (Eriksson ym. 2004). Tutkimuksissa selvisi, että lajimäärä ja kasvillisuuden peittämä alue vähenee syvyyden suhteen selvästi enemmän laivaväyliä varrella kuin verrokkikohteissa. Kasvillisuusvyöhykkeet ovat siirtyneet ylöspäin syvällä heikentyneiden valolosuhteiden johdosta. Myös aaltojen ja jään aiheuttaman eroosion lisääntyminen voi aiheuttaa lajiston vertikaalista siirtymistä. Pehmeillä pohjilla esiintyviä lajeja väylillä esiintyi vähemmän ja vastaavasti kovien pohjien lajeja enemmän. Toisaalta Ahvenanmaalla on tehty tutkimusta, jonka mukaan kokonaislajimäärä on suurempi laivaväylillä pääasiassa suuremman punalevien lajimäärän vuoksi. Myös eräissä muissa tutkimuksissa makrolevien on todettu menestyvän laivaväylillä (Eriksson ym. 2004). Vaikka toisinaan aaltovaikutukset ovat positiivisia, yleensä vaikutukset paikallisiin ekosysteemeihin ovat kuitenkin kielteisiä (Rannat ym. 2005).

Kasvillisuuden muutokset heijastuvat selkärangattomiin eliöihin, joiden yhteisörakenteessa tapahtuu muutoksia. Muutoksista aiheutuvat seuraukset voivat ulottua edelleen kalastoon ja merilintupopulaatioihin asti. Rehevöityminen yhdessä aaltovaikutusten kanssa voi aiheuttaa vaikutuksia muun muassa silakan kutualueille (Nyman ym. 2005).

5.1.5 Väyläalueiden ympäristössä tapahtuvat ajalliset muutokset pohjaeliöstössä

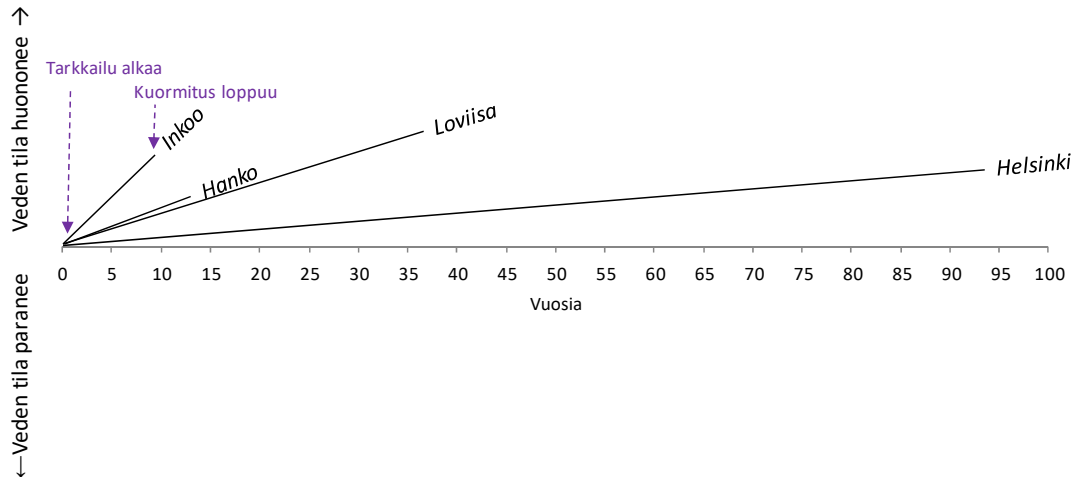
Vesikasviyhteisössä tapahtuneiden ajallisten muutosten toteaminen vaatisi laivaliikenteen ja todennettujen ympäristövaikutusten muutosten tarkastelun samanaikaisesti, mikä ei kuitenkaan ole mahdollista olemassa olevan aineiston avulla. Koska alusliikenteen vaikutusmekanismi on tiedossa, vesikasvillisuuteen kohdistuvaa ajallista muutosta voidaan arvioida laivaliikenteessä tapahtuneen muutoksen kautta: Vuosien saatossa aluskoot, alusten nopeudet ja liikennetiheydet ovat kasvaneet ja tätä kautta alusliikenteen vaikutukset ympäristöön ovat kasvaneet.

Yleisesti voidaan todeta, että vesikasvillisuuden taantuminen ihmistoiminnan kuormitusalueilla jatkuu niin kauan, kun kuormitus jatkuu. Pitkäaikainen kuormitus muuttaa vesikasvillisuuden yhteisörakennetta. Kuormituksen jatkuessa lajisto yksipuolistuu, mitä voidaan pitää veden ja ympäristön laadun heikkenemisenä. Voidaan arvioida, että tilanne on näin myös laivaväyliä vaikutusalueilla.

Pitkäaikaisen teollisuudesta peräisin olevan kuormituksen vaikutuksia vesikasvillisuuteen on tutkittu toiminnanharjoittajilta edellytetyssä velvoitetarkkailussa (Ruuskanen, 2017 ja Kuva 7).

Teollisuuden vesistöihin kohdistuvat kuormitukset yleensä lisäävät vesipatsaan ravinnetasoa, mikä johtaa muun muassa suurempaan planktonin perustuotantoon. Perustuotannon kasvaminen puolestaan johtaa vesipatsaaseen tunkeutuvan, vesikasvien tarvitseman auringonvalon määrän vähenemiseen. Alusliikenteen pääasiallinen ympäristövaikutus on vesipatsaan samentuminen, mikä myös vähentää vesipatsaaseen tun-

keutuvan auringonvalon määrää. Voidaan arvioida, että vesikasvillisuuden taantuminen tapahtuu myös alusliikenteen vaikutusalueilla vastaavalla tavalla, kun teollisuuden kuormituksen vaikutusalueilla on havaittu tapahtuvan.



Kuva 7. Pitkäaikaisen teollisuuslaitosten kuormituksen vaikutus vesikasvillisuuteen ja veden tilaan. Neljän rannikkokaupungin edustan vesikasvillisuuden ja veden tilan muutokset kuormitusalueilla on ilmaistu lineaarisen trendiviivojen avulla. Aikajana ilmaisee kuormituksen tarkkailuajan sen aloittamisesta vuosina. Havainnot aikajanan yläpuolella tarkoittavat vesikasvillisuuden ja veden tilan huononemista. Pääsääntöisesti vesikasvillisuus taantuu kuormituksen aikana. (Ruuskanen 2017)

5.1.6 Pohjaeliöstöön vaikuttavien alusten aaltojen horisontaalinen ja vertikaalinen ulottuvuus

Alusliikenteen horisontaaliset ja vertikaaliset ulottuvuudet eli vaikutukset vesikasvillisuuteen vaihtelevat alusliikenteen fysikaalisten voimien ja rantavyöhykkeen pohjan laadun ja profiilin mukaan. Vaikutuksen merkittävyyttä määritetään sen perusteella, kuinka paljon alusliikenne heikentää tai parantaa luontoarvoja. Alusliikenteen merkittäviä vaikutuksia havaitaan matalien lahtien ja pehmeiden pohjien kasvillisuudessa yli kahden kilometrin etäisyydellä väylästä (Erikson ym. 2004, Hansen & Snickars 2014). Toisaalta ulkosaariston syvien kalliopohjien makroleväyhteisöissä ei havaittu merkittävää muutosta muutaman sadan metrin päässä väylästä Vuosaaressa (Luku 5.2). Makrolevien esiintymisvaatimuksena on kiintoaineesta vapaata kalliopohjaa, johon levät kiinnittyvät. Vuosaaren tapauksessa kalliorannat sijaitsivat avomerellä, jossa on luonnostaan aallokkoa ja veden liikettä pitämässä pohjaa puhtaana kiintoaineesta, ja laivojen aallot edesauttavat tätä prosessia.

5.2 Alusten aaltovaikutukset pohjaeliöstöön: case Vuosaaren väylä

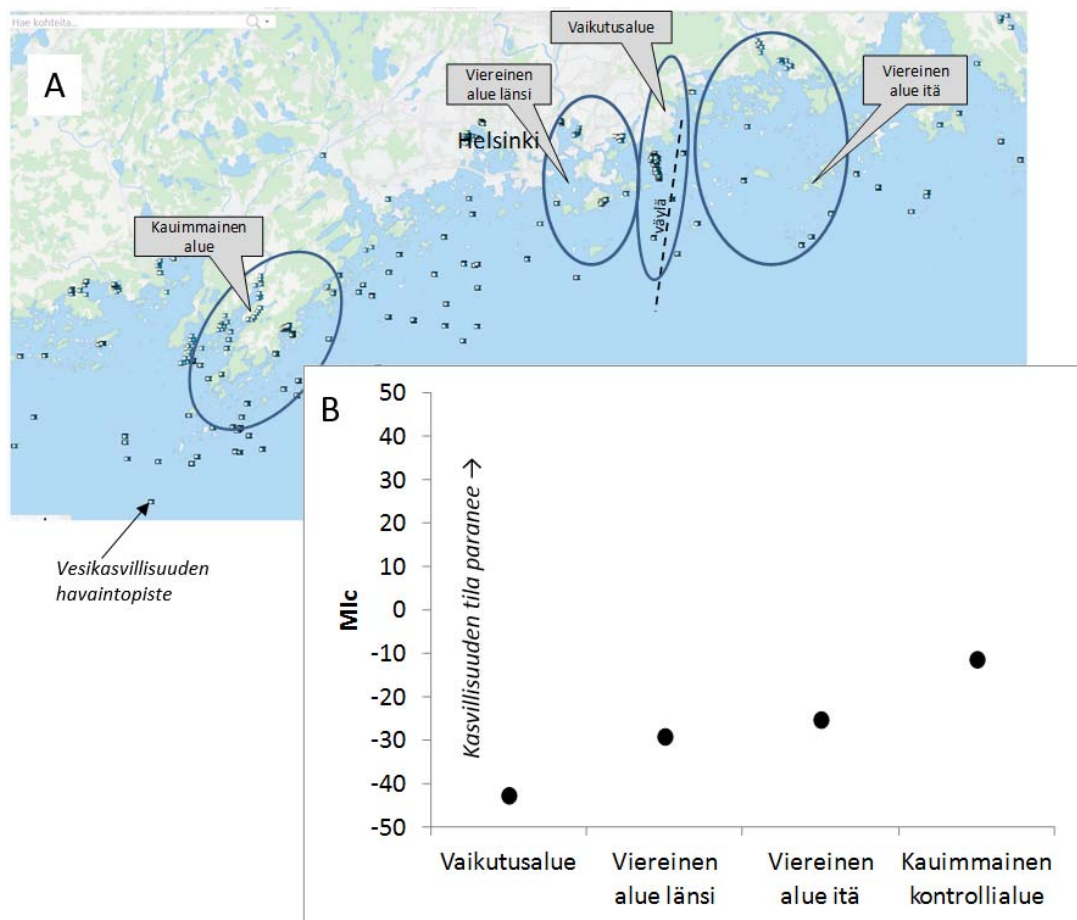
Vuosaaren sataman, väylän ja lähiympäristöstä kerätyn lähtöaineiston analyysin avulla tarkasteltiin Vuosaaren väylän alusliikenteen pitkäaikaisia ympäristövaikutuksia pehmeiden ja koviin pohjien vesikasvillisuuden yhteisörakenteeseen. Ympäristövaikutuksella tarkoitetaan tässä alusliikenteen aiheuttamaa tapahtumaa, joka välittömästi tai välillisesti muuttaa vesikasvivyhteisön rakennetta. Vesikasvillisuuden yhteisörakennetta ja sen muutosta tarkasteltiin seuraavassa MI_C ja FMI -menetelmillä (ks. Luku 2.2 Aineisto ja menetelmät), jotka kuvaavat todennetusti ihmistoiminnan vaikutuksia (paineita) vesikasvillisuuteen.

Kirjallisuuden perusteella laivaväylien vaikutusalueella vesikasvillisuuden yhteisörakenne on erilainen verrattuna niin sanottuun luonnolliseen ympäristöön. Laivaväylien vaikutusalueella on ympäristömuutoksia sietäviä lajeja enemmän suhteessa herkkiin lajeihin. Alusliikenteen vaikutus ilmenee muun muassa vesikasvillisuuden lajistossa, peittävytydessä ja kasvusyvytydessä, jotka kaikki taantuvat alusliikenteen vaikutusalueilla.

Kirjallisuudessa ei yleensä ole esitetty suoraan mittauksin todennettu alusliikenteen vaikutuksia vesikasvillisuuteen, vaan vaikutus on päätelty osoittamalla tilastollisesti merkittävä riippuvuussuhde vesikasvien yhteisökoostumuksella ja laivaväylien etäisyydellä. Veden sameusarvot ovat korkeampia laivaväylien vaikutusalueella.

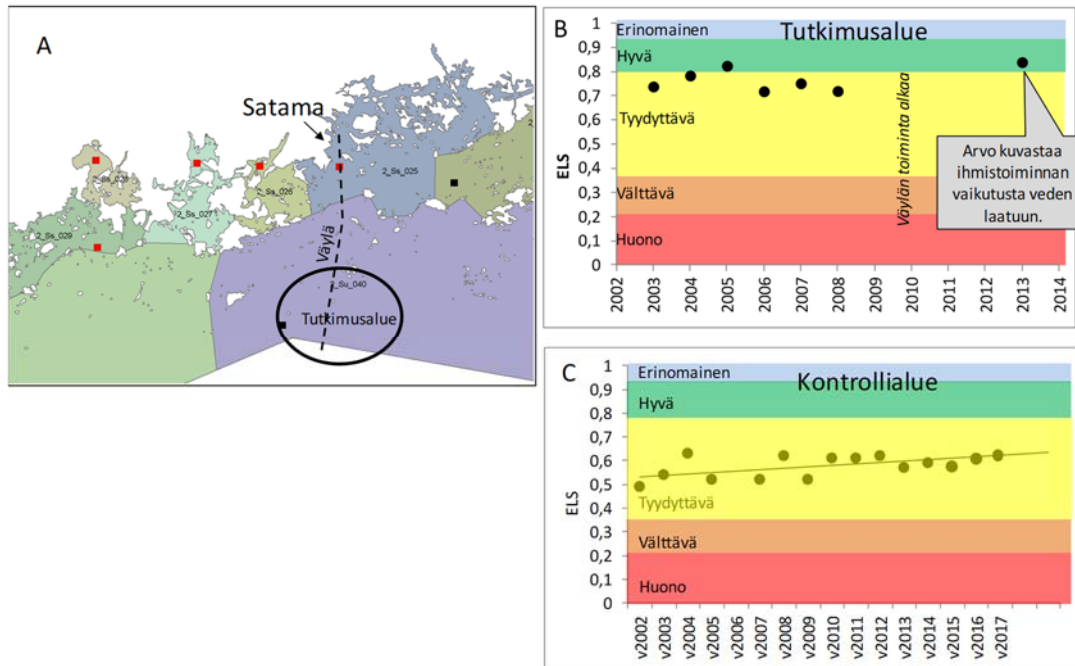
MI_C -menetelmän avulla tarkasteltiin alusliikenteen paikallisia vaikutuksia vesikasvillisuuteen vaikutusalueella noin 1,5 km etäisyydellä väylästä ja kauempana vertailualueilla noin 2–70 kilometrin etäisyydellä väylästä (Kuva 8). Analyysissä käytettiin hiekkapohjilta tehtyjä havaintoja, jotka edustivat vedenalaiset hiekkasärkät (1110)-luontotyyppiä. Havaittiin, että MI_C -arvo on matalampi väylän vaikutusalueella olevilla havaintopisteillä verrattuna väylän itä- ja länsipuolen alueiden (2–10 km väylästä) arvoihin (Kuva 8).

Mitä pienempi MI_C -arvo on, sitä suurempi on ihmispaine. Väylästä kauimmaisella kontrollialueella MI_C -arvo on suhteellisesti suurin. Vuosaaren väylän vaikutukset vesikasvivyhteisön rakenteeseen ovat samansuuntaisia kirjallisuudessa esitettyjen tutkimustulosten kanssa. On huomioitava, että väylän vaikutusalueen laajuus on määritetty kirjallisuuden mukaan. Todellisuudessa väyläalueen viereiset itä- ja länsipuolen alueet saattavat olla myös osin väylän vaikutuksen piirissä.



Kuva 8. Vuosaaren väylän vaikutusalueen ja eri etäisyyksillä olevien paikkojen vesikasvillisuuden tila ilmaistuna MI_C -indeksillä. Analyysiin on otettu mukaan pehmeän pohjan näytepisteitä ympäröidyiltä alueilta. Kuva on tehty aineistolla, joka on kerätty parin vuoden ajanjaksolla. (Kartta-pohja: Velmu-karttapalvelu)

Luontotyyppin Riutat (1170) vesikasvillisuuden (makrolevien) ajallista muutosta voidaan tarkastella FMI-menetelmällä. FMI (Finnish Macrophyte Index) on indeksi, joka perustuu tiettyjen indikaattoripunalevien alakasvurajan syvyyden muutoksiin, mitkä puolestaan ilmentävät ihmistoiminnan paineita. FMI-menetelmällä arvioitu makrolevien tilan muutos on ilmaistu ELS-arvoina (ekologinen laatusuhde) Vuosaaren sataman ja väylän läheisyyden tutkimuspisteiltä ennen väylän rakentamista ja sen rakentamisen jälkeen (kuva 9). Tutkimuspisteet sijaitsivat ulkosaaristossa. ELS-arvoissa ei ole merkittävää muutosta vertailtaessa ajanjaksoa ennen ja jälkeen sataman ja väylän avaamista liikenteelle. Voidaan päätellä, että laivaväylällä ei ole ollut merkittävää vaikutusta tutkimusalueen kalliorantojen makrolevien alakasvusyvyyksiin. Tutkimusalue sijaitsee syvän veden äärellä kalliorannalla, jolloin väylien samennusvaikutusta ei esiinny. Alueella tehdyt sameusmittaukset eivät osoittaneet merkittävää muutosta pintavesien sameudessa alusliikenteen aikana.



Kuva 9. FMI-menetelmällä arvioitu makrolevien tilan muutos ELS-arvoina (ekologinen laatusuhde) ilmaistuna Vuosaaren sataman ja väylän läheisyyden ulkosaariston kovien kalliopohjien tutkimuspisteiltä ennen väylän rakentamista ja sen rakentamisen jälkeen (B) sekä kontrollialueita läntiseltä Suomenlahdelta (C). Tutkimusalueen sijainti on esitetty kuvassa A, kontrollialueen sijainti ei näy kuvassa. (Karttapohja: ympäristöhallinnon avoin aineisto)

Voidaan arvioida, että alusliikenteen merkittävin ympäristövaikutus esiintyy pehmeiden pohjien ympäröivillä suhteellisen matalilla kalliorannoilla esiintyvissä vesikasviyhteisöissä. Alusliikenteen aiheuttama veden liike irrottaa pehmeiltä pohjilta pohja-ainesta vesipatsaaseen, mikä samentaa vettä myös kalliorannoilla.

5.3 Erilaisten luontotyyppien esiintyminen väyläalueilla ja niiden ympäristössä

Väyläliikenteen vaikutusalueella olevia yleisimpiä rannikkomme luontotyyppinä Natura 2000 luontotyyppiluokittelun mukaan ovat vedenalaiset hiekkasärkät (1110), rannikon laguunit (1150), laajat matalat lahdet (1160), riutat (1170) sekä kapeat murtovesilahdet (1650).

Kansallisia vesikasvillisuuteen liittyviä luontotyyppinä ovat muun muassa hydrolitoraalien rihmaleväyhteisöt, sublitoraalien rihmaleväyhteisöt, kallio- ja kivikkopohjien rakokleväyhteisöt, punaleväyhteisöt, meriajokasyhteisöt, uposkasvivaltaiset pohjat ja näkinpartaisniityt.

Vesilaissa on mainittu luontotyyppit fladat ja kluuvit. Luonnonsuojelulaissa on myös mainittu muutama uhanalaisia ja silmälläpidettäviä putkilokasvilajia, kuten meriajokas (*Zostera marina*), jotka esiintyvät pääosin pehmeillä pohjilla muutaman senttimetrin syvyydestä 3–4 metrin syvyyteen.

5.4 Alusten aaltovaikutuksille herkkimmät luontotyypit, pohjatyypit ja alueet

Erityisesti matalien pehmeiden pohjien vesikasvillisuuden monimuotoisuus on taantunut alusliikenteen vaikutusalueilla (Erikson ym. 2004, Hansen & Snickars 2014). Kalliorantojen makroleväyhteisöjä ei ole tutkittu samalla laajuudella.

Luontotyyppien luontoarvot saattavat vaihdella paikkojen välillä ja ajallisesti paikkojen sisällä. Joillakin luontotyypeillä luontoarvot saattavat olla heikompia luonnollisista syistä. On todennäköistä, että luontoarvot saattavat ovat heikentyneitä ja niiden heikentymisprosessi on käynnissä meriväylän ympäristövaikutuksen takia.

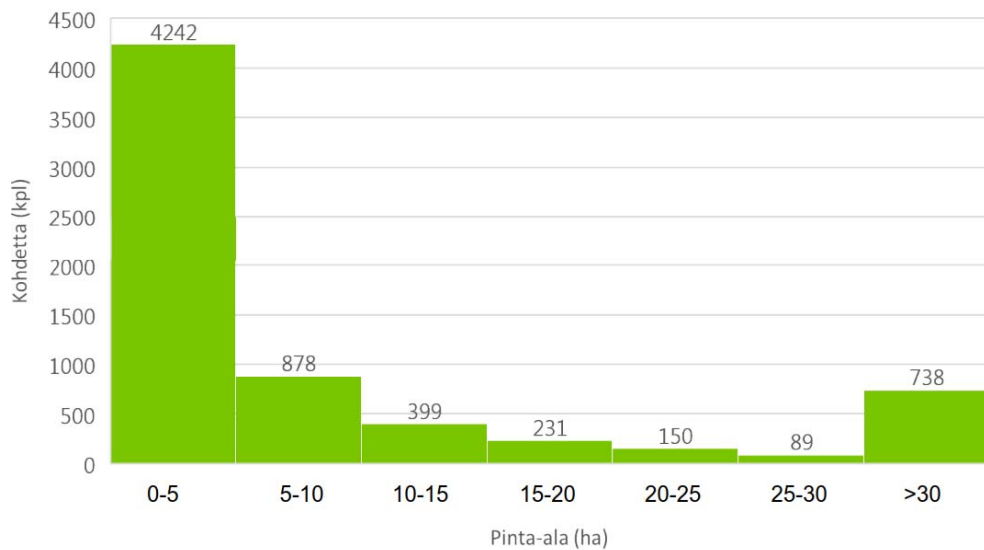
Erityisen herkkiä alusten aaltojen haittavaikutuksille ovat alueet, joilla luonnonaaltojen vaikutus on vähäistä. Tällaisia ovat muun muassa suojaiset lahdet ja laguunit sekä fladat. Laiva-aaltojen aiheuttama pitkäaikainen veden sameneneminen vaikuttaa kaikkien luontotyyppien kasvillisuuteen.

5.5 Aaltovaikutuksille herkkimmät alueet Suomen rannikkovesissä

Vesikasvillisuuden vuotuinen kasvukausi on lyhyempi pohjoista ja itää kohden mentäessä Suomen rannikon eteläisiin ja lounaisiin rannikkovesiin verrattaessa. Lisäksi pohjoisilla merialueilla ja itäisellä Suomenlahdella meriveden suolapitoisuus laskee, jolloin niin sanottujen mereisten lajien esiintymisien olosuhteet heikenevät ja eliöt ovat selviytymisrajojensa lähellä. Tällöin ympäristövaikutukset ovat merkittävämpiä kuin alueilla, joilla lajien elinolosuhteet ja palautumiskyky ovat suotuisimmat.

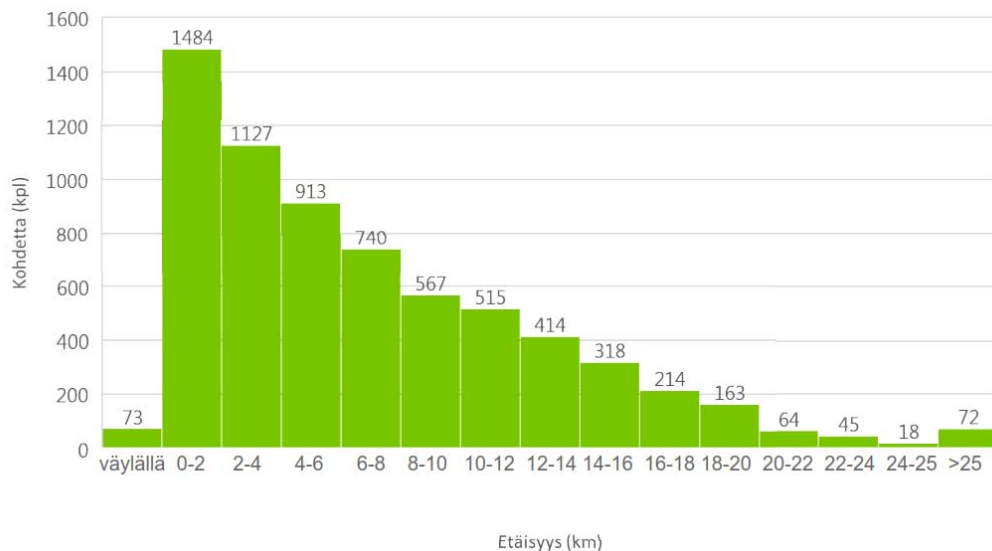
Aaltovaikutuksille herkkä alueet paikannettiin paikkatietoanalyysillä valikoiden matalia, sulkeutuneita ja pehmeäpohjaisia alueita. Tuloksia tulkittaessa on syytä huomioida, että aineisto tuotettiin melko yksinkertaisella paikkatietoanalyysillä, eikä tulosten rajauksessa huomioitu esimerkiksi veden sameutta ja biologisia arvoja. Niitä tosin tarkastellaan aineiston ominaisuustiedoissa. Tuloksia kartalla ja niitä koskevia tilastoja esitetään liitteessä 2.

Herkkiä alueita on paljon matalilla ja saaristoissa rannikoilla ja merenlahdissa esimerkiksi Vaasan ja Porin seudulla ja Turun saaristossa. Paikkatietoanalyysillä saatuja herkkiä kohteita on yhteensä noin 6 700 kpl ja niiden pinta-ala on noin 166 000 ha. Suurin kohde on 3 619 ha kohteiden mediaanin ollessa 3,8 ha. Valtaosa kohteista on siis pieniä, muutaman hehtaarin kokoisia, mutta vähälukuinen joukko hyvin suuria kohteita nostaa keskiarvoa (Kuva 10).



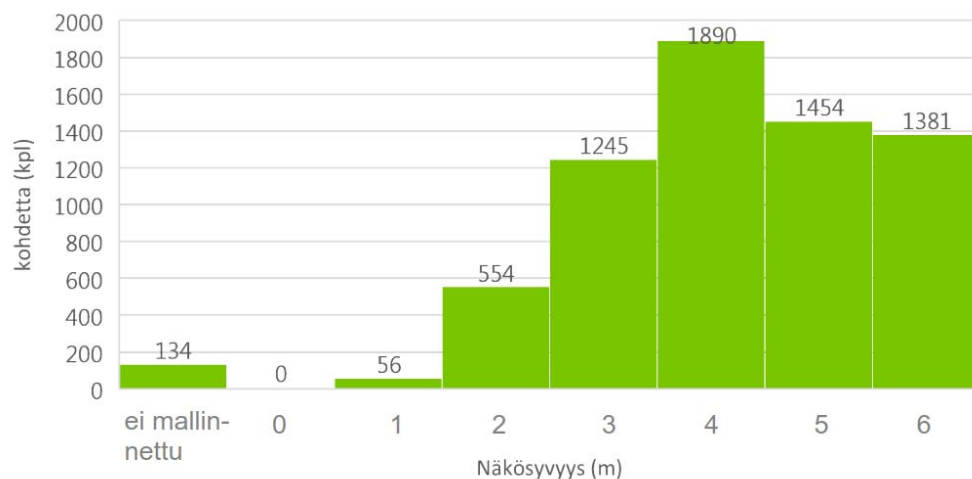
Kuva 10. Aaltovaikutuksille herkkien kohteiden pinta-alan jakautuminen.

Noin 1500 kohdetta on keskimääräiseltä etäisyydeltään alle 2 km etäisyydellä laivaväylästä ja 73 kohdetta sijoittuu laivaväylälle (Kuva 11). Lisäksi moni seuraavalle vyöhykkeelle luokitelluista kohteista sijoittuu osittain alle 2 km etäisyydelle laivaväylistä.

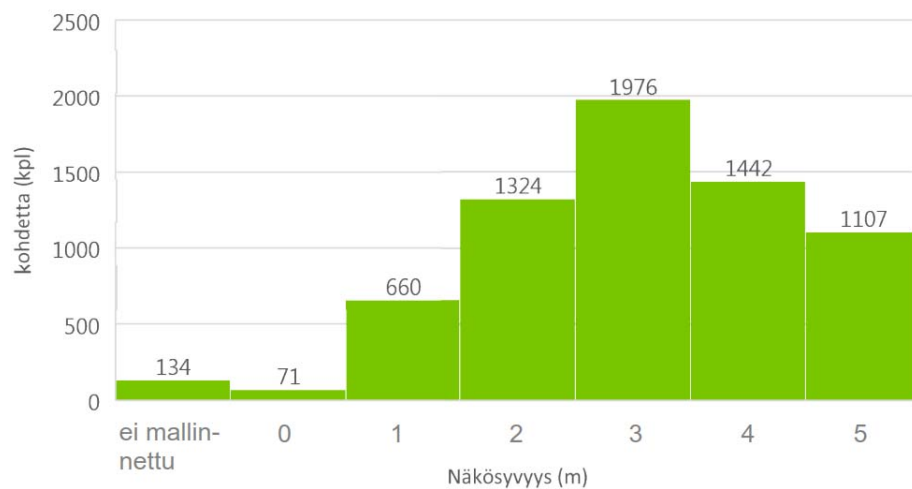


Kuva 11. Kohteiden keskimääräinen etäisyys kauppaliikenteen laivaväylästä.

Kohteiden herkkyyteen alusten aaltovaikutuksille vaikuttavat myös alueen luontainen näkösyvyys kasvukaudella ja biologiset arvot. Osa kohteista sijoittuu sameille alueille, kuten esimerkiksi runsaasti suspentoitunutta sedimenttiä kuljettavien jokisuiden tuntumaan. Valtaosa herkistä kohteista sijoittuu alueille, joilla näkösyvyys on 3–4 m (Kuva 12 ja Kuva 13). Kohteita on varsin runsaasti kirkkaammissakin vesissä.



Kuva 12. Kohteille sijoittuva suurin VELMU-aineiston mukainen kasvukauden aikainen näkösyvyys.



Kuva 13. Kohteille sijoittuva pienin VELMU-aineiston mukainen kasvukauden aikainen näkösyvyys.

Mahdollisia biologisia arvoja tarkasteltiin sijoittumista suhteessa Natura 2000 -alueisiin sekä näkinpartais- ja meriajokaslevinneisyysmallien tuloksiin. Mallinnuksen tuloksista poimittiin ne alueet, joilla on suotuisat tai erittäin suotuisat olosuhteet lajien esiintymiselle. Suotuisien alueiden osuus laskettiin jokaiselle kohteelle erikseen. Kohteita, joissa suotuisia alueita oli näkinpartaiselle vähintään 10 prosenttia pinta-alasta, oli 741 kappaletta. Kohteita, joissa meriajokkaalle suotuisia alueita oli vähintään 10 prosenttia, oli 265 kappaletta. Natura-alueille sijoittuvia tai niihin rajautuvia kohteita oli 821 kappaletta.

6 Yleistettävyyys ja epävarmuudet

Samennus on tärkein vedenalaista ympäristöä muokkaava laivojen aaltojen vaikuttaja. Samennuksen lisääntyminen vaikuttaa kaikkiin vedenalaisiin luontotyyppeihin heikentämällä vesikasvillisuuden elinmahdollisuuksia. Tämä on yleistettävissä koko Suomen rannikolle, mutta sitä on syytä seurata kohteissa, joissa meriliikenteen muutoksen epäillään muuttavan myös samennusvaikutusta.

Herkimpiä alueita sedimentaation lisääntymiselle ovat arvioimme mukaan kovien pohjien yhteisöt, joita ympäröivät matalat, sedimentin huuhtoutumiselle alttiit alueet. Tämä pitää paikkansa koko Suomen rannikon alueella, sillä kovien pohjien yhteisöt sievät huomoinen lisääntyvän sedimentaation vaikutuksia kuin pehmeiden pohjien yhteisöt.

Tärkein laivojen aaltoihin vaikuttava muuttuja on laivan nopeus. Myös nopeuden muutokset ja laivojen kulkusuunta vaikuttavat aallokon voimakkuuteen. Tulos on todennettu useissa julkaisuissa ja yleistettävissä koko Suomen merialueelle.

Laiva-aaltomalli -työkalu kaipaa kenttäkoetta mallin kalibroimiseksi ja sen toimivuuden varmistamiseksi. Tämän jälkeen sitä voidaan käyttää apuna mm. laiva-aallokon luontovaikutusten kenttätutkimuksissa sekä meriliikenteen suunnittelussa.

Alusliikenteen vaikutusalueilla saattaa esiintyä muitakin vesikasvillisuuteen vaikuttavia kuormituksia. Vesialueen sisäinen kuormitus, pistekuormituksena teollisuuden ja yhdyskuntien vesipäästöt sekä hajakuormitus ulapalta vaikuttavat vesikasvillisuuden yhteisörakenteisiin. Edellä mainittujen kuormitusten ja alusliikenteen vaikutuksia voidaan erotella koejärjestelyin.

7 Johtopäätökset ja suositukset

- Alusliikenteen aiheuttamien aaltojen vaikutus vesiluontoon johtuu pääasiassa veden samenenemisen kautta vesikasvillisuuden kasvuolosuhteiden muutoksista.
- Alusten aiheuttamien aaltojen vaikutuksille herkimpiä ovat suojaiset ja matalat alueet, joiden läheisyydessä on pehmeää pohjaa.
- Alusten aiheuttamien aaltojen haittavaikutuksia voidaan vähentää nopeusrajoituksin, joissa otetaan huomioon veden syvyys sekä väylän vaikutuspiirissä olevien herkkien alueiden sijainti.
- Alusten aiheuttamien aaltojen voimakkuutta liikenne- ja syvyystietojen perusteella kuvaavaa mallia testataan jatkotutkimuksin esimerkiksi Helsingin edustalla, missä liikenne erikokoisilla ja eri nopeuksilla liikkuvilla aluksilla on voimakasta. Testeissä malli myös kalibroidaan, jotta se olisi mahdollisimman käyttökelpoinen tulevien väylien ja liikenneolosuhteiden muutosten suunnittelussa.

Lähteet

Kirjallisuus ja internet

Allenström, B., Bergdahl, L., Eriksson, L., Eskilsson, C., Forsman, B., Hanson, H., Johansson, J., Johansson, L., Leer-Andersen, M., & Svensson, U., 2003. The Interaction of Large and High-Speed Vessels with the Environment in Archipelagos –Final Report. SSPA Research Report No.122, 2003. Sweden. ISBN 91-86532-35-9. 92 s + liit. 166 s. Viitattu teoksen Paukkeri 2010 mukaan.

Airaksinen O. & Karttunen K. 2001: Natura 2000-luontotyyppiopas. - Suomen ympäristökeskus.

Eriksson B.K., Sandström A., Isæus M., Schreiberd H., Karås P. 2004: Effects of boating activities on aquatic vegetation in the Stockholm archipelago, Baltic Sea - Estuarine, Coastal and Shelf Science 61 (2004) 339–349. and Shelf Science, 61, 339–349. DOI: 10.1016/j.ecss.2004.05.009.

Friman, H. (1989). Autolauttaliikenteen vaikutus vesimassaan ja rantoihin Etelä-Airistolla. Pro gradu tutkielma. Turun yliopisto. Maantieteen laitos. 79 s. Viitattu teoksen Paukkeri 2010 mukaan.

Granath, L. 2007. Stranderosionsrisker I Samband med anlöp av "Navigator of the Seas". Hydrographica AB. 21 s.

Hansen J.P. & Snickars M. 2014: Applying macrophyte community indicators to assess anthropogenic pressures on shallow soft bottoms. - Hydrobiologia.

Kangas, P., Autio, H., Hällfors, G., Luther, H., Niemi, Å. & Salemaa, H. 1982: A general model of the decline of *Fucus vesiculosus* at Tvärminne, south coast of Finland in 1977-81. - Acta Bot. Fennica 118: 1-27.

Kelpsaite, L., Parnell, K.E. & Soomere, T. 2009. Energy pollution: the relative influence of wind-wave and vessel-wake energy in Tallinn Bay, the Baltic Sea. Journal of coastal research, 56, 812–816.

Lindfors, A. & Huttunen, O. 2015. Selvitys alusten ajonopeuden vaikutuksesta pinnan korkeuden vaihteluun ja vedenlaatuun Airiston pohjoisosissa sekä arvio tuulen aiheuttamasta aallokosta. Luode Consulting Oy laatinut Liikenneviraston toimeksiannosta. 23 s.

Lindfors, A & Kiirikki, M. 2015. Selvitys ajonopeuden muutoksen vaikutuksista virtauksiin, imuvaikutukseen ja rantaeroosiin Överön pohjoispuolisella väyläosuudella. Luode Consulting Oy laatinut mm. Liikenneviraston toimeksiannosta. 12 s.

Mykkänen, J. & Lindfors, A. 2013. Porokarin potkurivirtausselvitys. Luode consulting Oy laatinut Liikenneviraston ja Varsinais-Suomen vesistösaneeraus Oy:n toimeksiannosta. 15 s.

Mykkänen, J. & Kiirikki, M. 2015. Alusliikenteen aiheuttaman aallokkorasituksen selvitys Vuosaaren väylällä. Luode Consulting Oy laatinut Liikenneviraston toimeksiannosta. 23 s.

Nyman, T., Happonen, K., Liimatta, A., Rosqvist, T., Rytönen, J. & Tuominen, R. 2005. Kökarin väyläsuunnitelman riskianalyysi. Merenkululaitoksen julkaisuja 9/2005. 93 s.

Paukkeri, S. 2010. Nopeusrajoitukset alusliikenteen ympäristövaikutusten, turvallisuuden ja sujuvuuden kannalta Vuosaaren meriväylällä. Liikenneviraston selvityksiä 50/2010. 74 s.

PIANC (International Navigation Association) 2003. Guidelines for managing wake wash from high-speed vessels. Report of the working group 41 of the Maritime Navigation Commission. 32 p.

Rannat, K., Soomere, T., Pöder, R. & Erm, A. 2005. The shape of wake waves from high-speed ferries and their influence in the coastal area. Geophysical Research Abstracts, Vol. 7.

Raunio A., Schulman A. & Kontula T. (toim.) 2008: Suomen luontotyyppien uhanalaisuus – Osa 2. - Suomen ympäristö 8 (2).

Ruuskanen A. 2016: Makrolevien esiintyminen ja seuranta Uudenmaan rannikkovesillä. Valtakunnallisen makrofytyttiseurannan kuvaus ja toteutus Uudellamaalla 1993–2016. - Uudenmaan elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus. Raportteja 100/2016

Ruuskanen A. 2017: Velvoitetarkkailujen vesikasvillisuustutkimuksia vuosina 1921–2014 -vesikasvillisuuden muutokset veden tilan muutosten kuvaajina Uudenmaan rannikkovesillä. - Uudenmaan elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus. Raportteja 34/2017.

Rytönen, J., Sassi, J. & Koskivaara, R. 2001. Laivojen aiheuttama aalto- ja virtaushäiriö rannassa. Tutkimusraportti, VTT valmistustekniikka. 40 s.

Rytönen, J. ym. (2002). Alusten aiheuttama aalto- ja virtaushäiriö. VTT, Valmistustekniikka. Espoo. Tutkimusraportti VAL34-013037. 77 s + liit 7 s. Viitattu teoksen Paukkeri 2010 mukaan.

Rönnerberg, Olof 1981: Traffic effects on rocky-shore algae in the archipelago sea, SW Finland. PhD thesis. Åbo Akademi.

Soomere, T. 2006. Nonlinear ship wake waves as a model of rogue waves and a source of danger to the coastal environment: a review. Oceanologia, 48, 185–202.

Suomela, A. 2016. Pohjasedimentin eroosioherkkyys Pohjois-Airistolla, Saaristomereillä. Pro gradu –tutkielma, Oulun yliopisto. 58 s.

Virtasalo, J. 2001. Laivaliikenteen aiheuttamien ja luonnollisten virtausten vaikutus sedimentaatio-olosuhteisiin Pohjois-Airistolla. Pro gradu – tutkielma, Turun yliopisto Geologian laitos. 65 s.

Virtasalo, J., Kohonen, T. & Vuorinen, I. 2000. Laivaliikenteen aiheuttamat muutokset virtausoloihin Ruissalon väylällä. Raportti virtausmittauksista 24.8. ja 19.-20.10.2000. Saaristomeren tutkimuslaitos. Turun yliopisto. 15 s. Virtasalo 2001 mukaan.

Paikkatietoaineistot

SYKE 2015. Näkinpartaisniitty- ja meriajokasmallinnuksen tulosaineistot. Saatu 24.11.2017

SYKE 2015. Aaltoekspositio ja näkösyvyys. Haettu 2017.

SYKE 2015. VELMU-syvyysmalli. Haettu 2017.

GTK 2015. Merenpohjan kovat ja pehmeät alueet 1:250 000. Haettu GTK:n WFS-rajapinnalta 2017.

SYKE 2017. Natura 2000 -alueet.

Liikennevirasto 2017. Väyläaineistot ja rajoitusalueet. Haettu Liikenneviraston WFS-rajapinnalta 2017.

MML 2017. Taustakarttasarja.

Alusliikenteen aaltovaikutukset pohjaeliöstöön

Paikkatietoaineiston metatietokuvaus

Selvityksen yhteydessä muodostettiin paikkatietoaineistoja alusten aaltovaikutuksille herkistä kohteista. Tulosaaineisto muodostettiin hakemalla VELMU-aineistoista matalat, aaltoekspositioltaan sulkeutuneet pehmeäpohjaiset alueet. Lisäksi kohteille laskettiin ominaisuustietoja, joiden perusteella muodostettiin raportointia varten tilastoja.

Tulosaineistojen muodostaminen:

- Matala (alle 5 m vyöhykkeellä Velmu-syvyysaineistossa)
- Sulkeutunut (Velmun aaltoekspositio luokat 1-5)
- Pehmeät pohjat (Velmu lähdeaineistona)
- Ala vähintään 1 ha
- Natura-tiedot noudettu ympäristöhallinnon SAC/SPA/SCI-aineistoista
- Etäisyystiedot lähimpään kauppamerenkulun väylään laskettu Liikenneviraston väyläalueista ja väyläviivoista cost distance rasterille
- Meriajokasmallitulokset ja näkinpartaismallitulokset saatu Meri Koskelaiselta (SYKE) 23.11. Niistä laskettiin kunkin kohteelle osuvat pikselimäärät ja yli 50 % todennäköisyysluokkien osuus kunkin kohteen pinta-alasta
- Näkösyvyys VELMU-aineistosta

Aineistosta tehtiin kaksi versiota: Siistitty versio on sama aineisto kuin 2.12 luotu, mutta siitä on poistettu luokkia.

TULOSAINEISTO: Aaltovaikutuksilleherkatkohteet.shp

Muodostettu 2.12.2017

EPSG 3067

Koodaus UTF-8

ESRI Shapefile

Aineisto on muodostettu Sitowisessä Liikenneviraston toimeksiannosta

Ominaisuustietojen selite:

ala_m: kohteen pinta ala m²

Eta_Max suurin etäisyys nykyisestä kauppamerenkulun laivaväylästä merialuetta pitkin metreinä

Eta_Mean: Keskimääräinen etäisyys nykyisestä kauppamerenkulun laivaväylästä merialuetta pitkin metreinä

➔ arvo -1: Ei yhteyttä laivaväyliin merirasteria pitkin, esim hyvin kapean salmen/kanavan mereen yhdistämät merenlahdet

naturaTunn: Natura-alueen tunnus (arvo annettu, jos kohde sijoittuu Natura-alueelle tai rajautuu siihen)

naturaNimi: Natura-alueen nimi (arvo annettu, jos kohde sijoittuu Natura-alueelle tai rajautuu siihen)

naturaTyyp: Natura-alueen tyyppi (arvo annettu, jos kohde sijoittuu Natura-alueelle tai rajautuu siihen)

Ajok_pix: Meriajokasmallinnuksen hilaruutujen lukumäärä kohteella.

Ajokas75co: luokan 51-75 % (= suotuisa) hilaruutujen lukumäärä kohteella

Ajokas99co: luokan 75-99 % (= erittäin suotuisa) hilaruutujen lukumäärä kohteella

AjokasPros: suotuisien ja erittäin suotuisien hilaruutujen yhteenlaskettu osuus koko ajokasmallinnuksen hilaruuduista (%)

➔ Meriajokasluokkien arvo -1 tarkoittaa, että kohde on mallinnuksen alueen ulkopuolella.

AjokasProsIn: Kokonaisluku luokasta AjokasPros

Nakin_cou: näkinpartaismallinnuksen hilaruutujen lukumäärä kohteella

Nakin50co: suotuisten ja erittäin suotuisten (51-99 %) hilaruutujen lukumäärä kohteella

Nakin_pros: Suotuisten ja erittäin suotuisten hilaruutujen yhteenlaskettu osuus kaikista kohteelle osuvista mallinnuksen hilaruuduista

NakProsInt: kokonaisluku luokasta Nakin_pros

naksyvmax2: Kohteen suurin näkösyvyysarvo metreinä (Lähde: VELMU näkösyvyys)

naksyvmin2: Kohteen pienin näkösyvyysarvo metreinä (Lähde: VELMU näkösyvyys)

➔ -1 = mallinnusalueen ulkopuolella

YKSINKERTAISTETTU TULOSAINEISTO: Aaltovaikutuksilleherkatkohteet_yksinkertaistettu.shp

ala: kohteen pinta ala m2

naturaTunn: Natura-alueen tunnus (esitetään vain, jos alue sijoittuu tai sivuaa natura-alueelle)

naturaNimi: Natura-alueen nimi (esitetään vain, jos alue sijoittuu tai sivuaa natura-alueelle)

Eta_Mean: Keskimääräinen etäisyys nykyisestä kauppamerenkulun laivaväylästä merialuetta pitkin metreinä

naksyvmax2: Kohteen suurin näkösyvyysarvo metreinä (Lähde: VELMU: näkösyvyys)

naksyvmin2: Kohteen pienin näkösyvyysarvo metreinä (Lähde: VELMU näkösyvyys)

➔ -1 = mallinnusalueen ulkopuolella

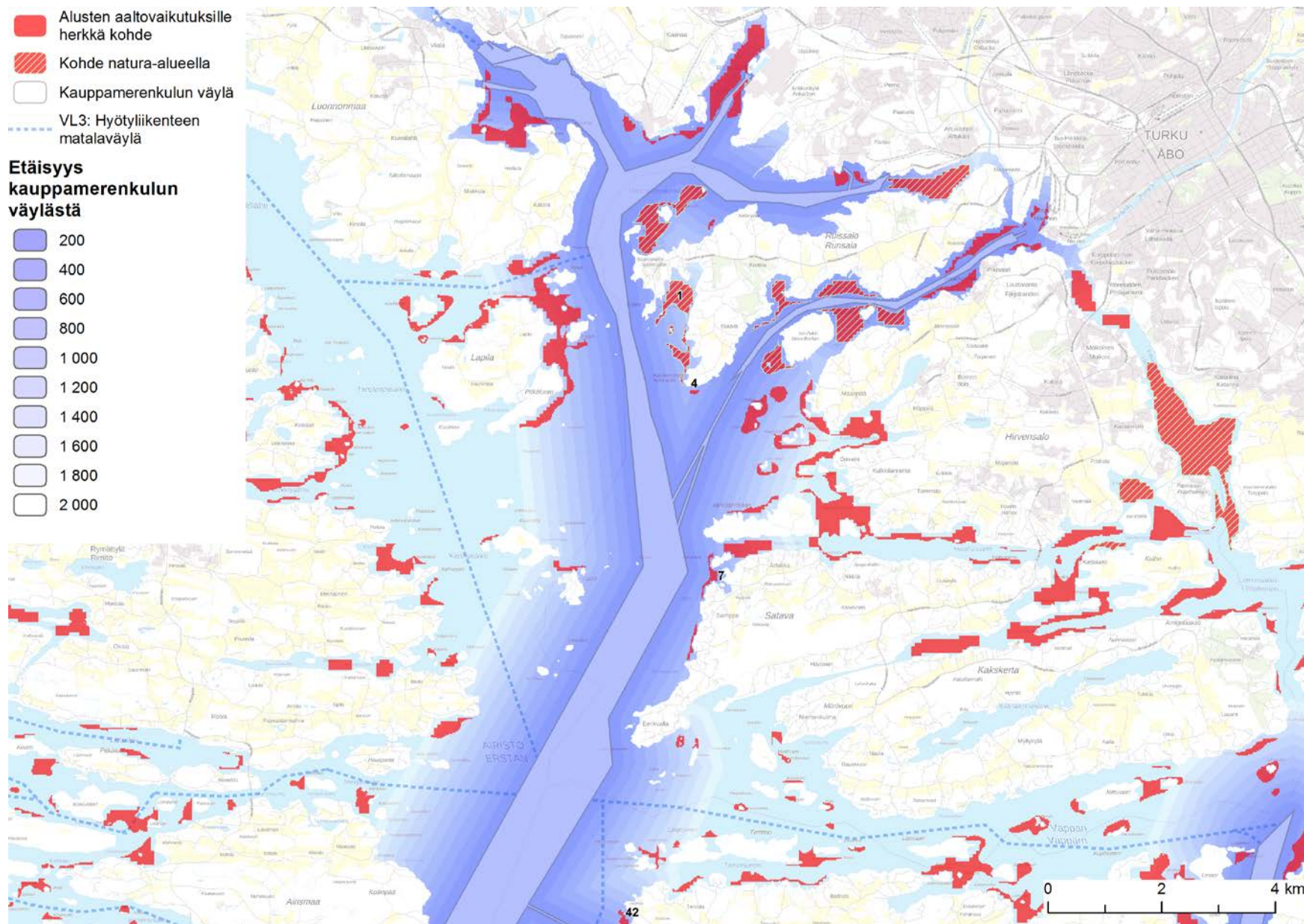
Alusten aaltovaikutukset

Paikkatietoaineiston esikatselukuvia

12.1.2018

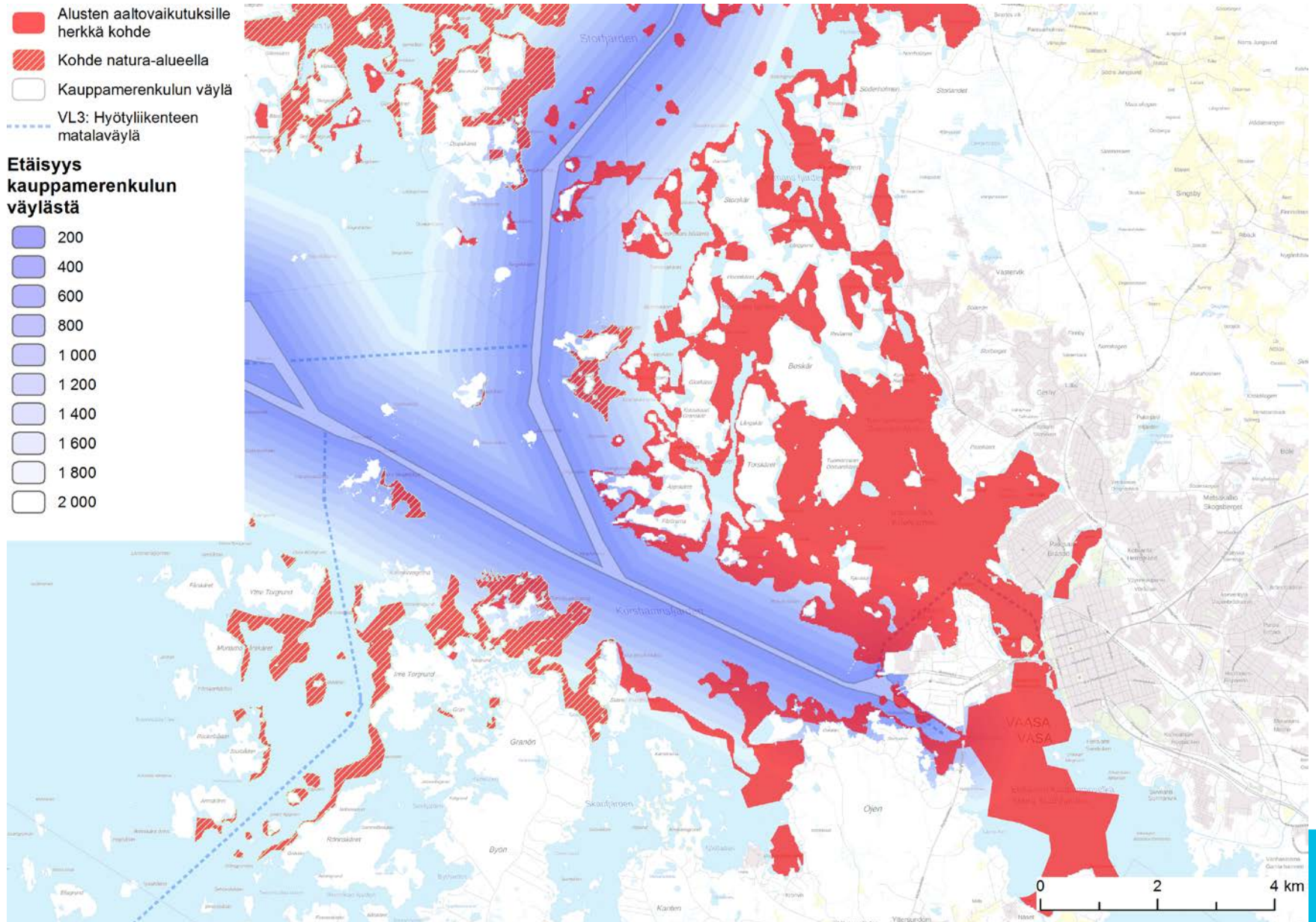


Turku

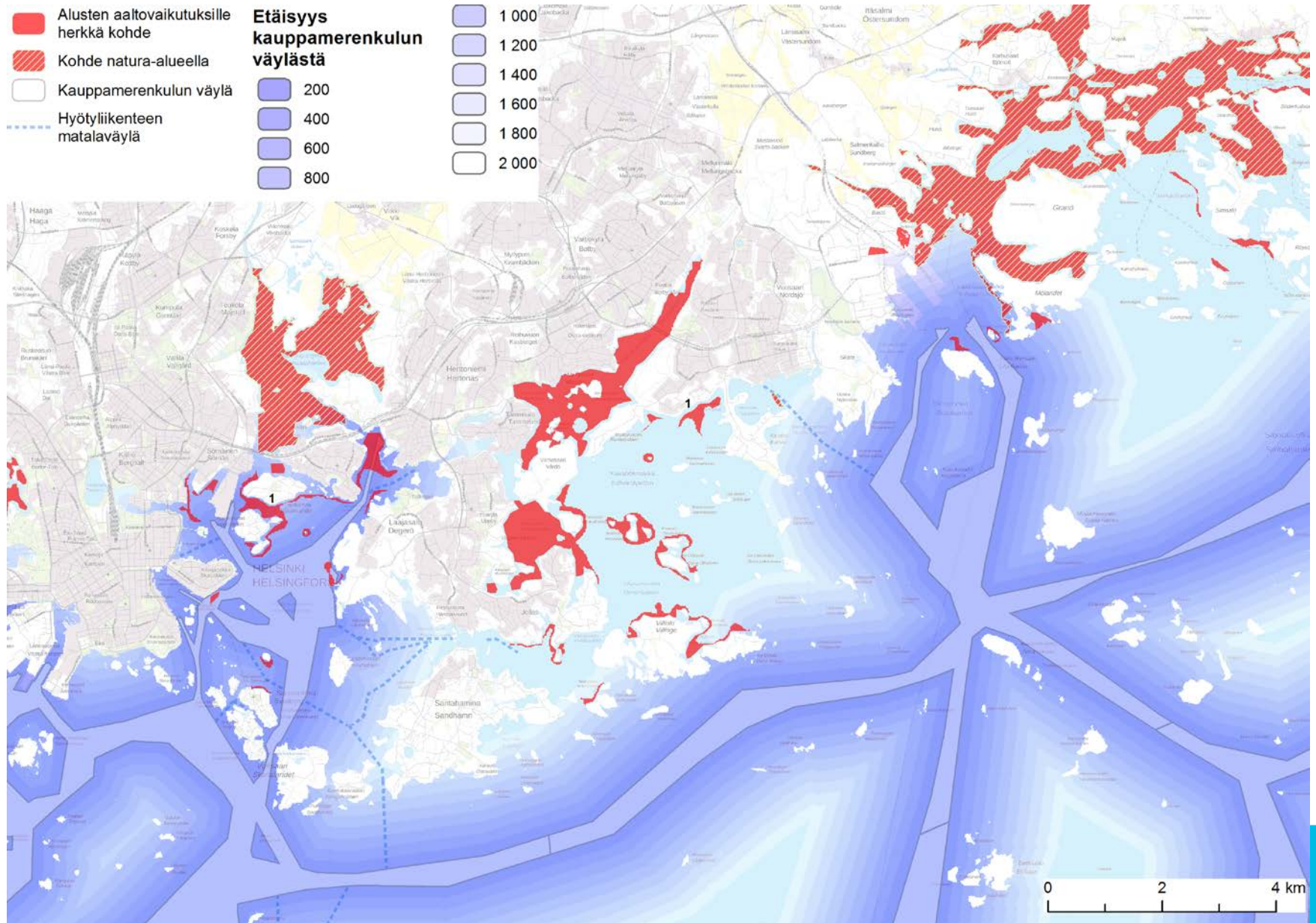


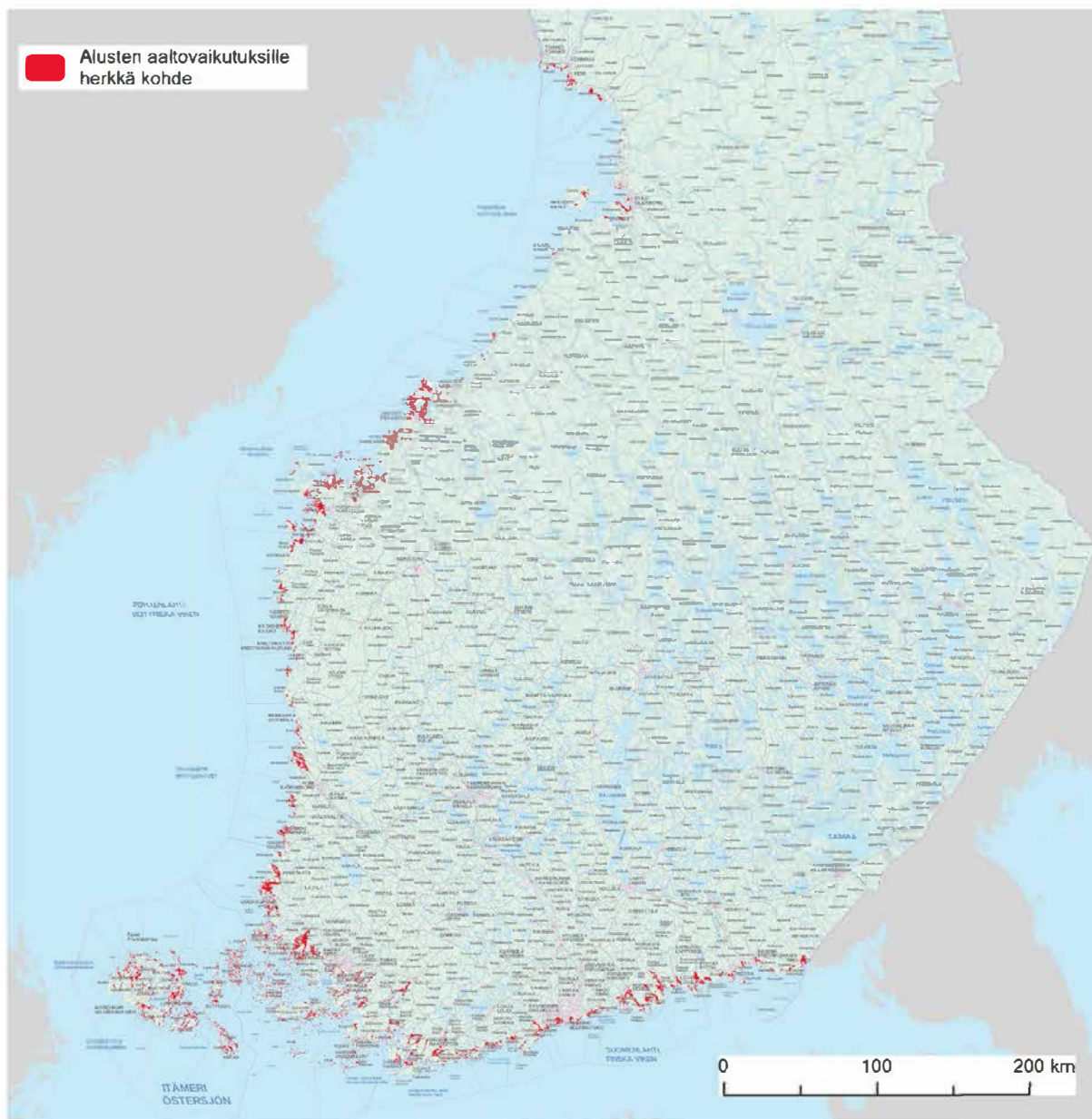
Vaasa

Liite 2 / 3 (5)



Helsinki





ISSN-L 1798-6656
ISSN 1798-6664
ISBN 978-952-317-525-9
www.liikennevirasto.fi

Liik
enne
vira
sto